

Em Torno da Dinâmica Não-Linear de Sistemas Discretos de Carga e Transporte

João Paulo Meixedo dos Santos Silva



Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia

FEUP



Departamento de Minas
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

24 de Maio de 2005

Dissertação apresentada à
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
para prestação de provas de
Doutoramento em Ciências de Engenharia

sob a orientação de:
Professor Doutor Carlos Manuel Novais Madureira
Professor Doutor Henrique Sérgio Botelho de Miranda
Professor Doutor Alexandre Júlio Machado Leite

para a Cristina
e para o Francisco

Reservei as primeiras linhas do presente documento para nelas inscrever as últimas palavras, e que dedicarei inteiramente a todos quantos me orientaram, motivaram, aconselharam, ouviram, enfim cuidaram de mim.

Evitando ser fastidioso, não posso deixar de salientar alguns agradecimentos particulares, sendo que o primeiro vai inteiramente para o Professor Madureira, pessoa que admiro como sendo alguém cuja genialidade reside, ainda mais, não na disponibilidade e facilidade com que se apresenta à resolução de todo o tipo de interrogações, mas sim na aparente simplicidade com que as levanta. Mais do que ajudar a ver coisas, ensina como olhar para as coisas.

Muito especial é também o agradecimento que endereço ao Alexandre, por ter pegado diariamente no outro remo: sem ele teria navegado permanentemente em círculos.

Agradeço igualmente ao Professor Miranda, pelo compromisso assumido e pela forma rigorosa e afectuosa que emprestou à análise de cada capítulo. Espero ter sabido utilizar de forma proveitosa todos os seus subsequentes comentários, sugestões e esclarecimentos.

Como primeiro benefício colhido do desenvolvimento do presente trabalho, destaco a confirmação de que possuo, na totalidade dos docentes do Departamento de Minas da FEUP, um grupo de inestimáveis amigos. Agradeço-lhes todos os suportes formais e informais que me foram quotidianamente disponibilizando. A eles devo, ainda, o desenterrar do conceito de *massa crítica*.

A terminar, saliento a importância que o ISEP, o IPP e o PRODEP, conjuntamente representaram ao proporcionar-me condições de trabalho que me permitiram concluir esta tarefa dentro dos prazos estipulados.

Resumo

O presente trabalho foi desenvolvido tendo como pano de fundo um aspecto peculiar da indústria mineira: os *sistemas-de-carga-e-transporte*, no caso específico das explorações a céu-aberto.

Foi implementado um modelo estocástico que nos permitiu estudar o papel desempenhado pelas diversas actividades – deliberadas e não-deliberadas – que constituem este tipo de sistemas, bem como analisar as interacções e a rede de ligações existentes entre essas mesmas actividades.

Não obstante termos, ao longo do estudo desta dinâmica não-linear, tido a possibilidade de confirmar algumas suspeitas comportamentais, a verdade é que também detectamos fenómenos não expectáveis.

Ao movimentarmo-nos por territórios que acreditávamos dominar, deparamo-nos, por vezes, com dinâmicas de características aparentemente caóticas e comportamentos presumidamente fractais.

Acreditamos que algumas das conclusões que neste documento ousamos arriscar, a par com a enorme quantidade e qualidade de dados obtidos, poderão constituir-se como importantes contributos para o estudo deste tipo de sistemas.

Abstract

The aim of this work was to study a peculiar aspect of the mining industry: the *load-and-transport-systems*, in the specific case of the open-pit mines.

We've implemented a random model that allowed us to study the role played by the diverse activities – deliberated and non-deliberated – that constitute this type of systems, as well as to analyse the interactions and the net of links between those activities.

As we developed our study of this nonlinear dynamics systems, we have had the opportunity to confirm some suspicions, as well as to discover some unexpected behaviors.

Sometimes, as we moved along some territories we believed to know, we came across some dynamics apparently characteristic of chaos, and some supposedly fractal behaviors.

We believe that some of the conclusions that we dare to risk, along with the enormous amount and quality of data, will be able to consist as important contributions for the study of this type of systems.

Résumé

Le but de ce travail se concerne à l'étude d'un aspect particulier de l'industrie minière : les systèmes charge-et-transport, dans le cas spécifique des mines à ciel ouvert.

Il a été implémenté un modèle aléatoire qui nous a permis d'étudier le rôle joué par les diverses activités qui constituent ce type de systèmes - délibérées et non-délibérées - aussi bien que ces interactions et ces filets de liaison.

Nonobstant nous avons eu l'occasion de confirmer quelques soupçons au décours de notre étude cette dynamique des systèmes non-linéaires, nous avons, aussi, découvert quelques comportements imprévus.

Ce pendant que nous nous déplaçons au long de certains territoires nous présumons dominer, parfois nous pouvons trouver certaines dynamiques avec caractéristiques apparemment chaotiques et quelques comportements typiques des fractales.

Nous croyons que certaines des conclusions que nous osons risquer dans cette thèse, aussi bien que les énormes quantités données et sa qualité, se pourront constituer comme des importantes contributions pour l'étude de ce type de systèmes.

Conteúdo

1	Nota Introdutória	1
1.1	Transporte mineiro	3
1.2	Unidades móveis	5
1.3	Ao cronómetro	6
1.4	Frotas	10
2	Sistemas de Carga e Transporte	13
2.1	Modelação e simulação	15
2.1.1	Lógica de programação	18
2.1.2	Evolução histórica	18
2.1.3	Linguagens e <i>softwares</i>	20
2.2	Método	21
2.2.1	Pensamento sistémico	21
2.3	Modelos estocásticos	28
2.3.1	Um modelo preambular	28
2.3.2	Dimensionamento de tolvas	31
2.3.3	Dimensionamento de frotas	32
2.4	Modelos determinísticos	41
2.5	Um sistema natural tentando ser racional	43
3	Uma Proposta de Arranque	47
3.1	Variabilidade vs produção	49

3.1.1	O algoritmo	49
3.1.2	Variabilidade	51
3.1.3	Produção	53
3.2	Coefficiente de variação	56
3.2.1	Procedimentos	56
3.2.2	Algumas conclusões	65
3.2.3	Uma função objectivo	67
3.2.4	Tempos de inactividade	74
3.2.5	Regresso à função objectivo	76
3.2.6	Produção <i>versus</i> tempos de inactividade	86
4	Escalas e Padrões	95
4.1	Redimensionamento da escala	97
4.1.1	A frota <i>2p6c</i>	97
4.1.2	Validação do cálculo	101
4.1.3	Uma perspectiva social(ógica)	106
4.2	Mobilidade das filas de espera	108
4.2.1	Uma hipótese	108
4.2.2	Uma dinâmica não-linear	109
4.2.3	Atractores regionais	111
5	Actividades dominantes	123
5.1	Tarefas críticas	125
5.1.1	A frota <i>2p6c</i>	125
5.1.2	Perseguindo uma hipótese	130
6	Coda	145
6.1	Opção por um caminho	147
6.1.1	E no entanto existe um patamar	149
6.1.2	Caos et all – em torno de dinâmicas não-lineares	155

6.2	Registo de intenções	158
A	Listagem do programa	163
B	Primeira abordagem	201
B.1	Ficheiro de <i>input</i> de dados	203
B.2	Tabelas de <i>input</i> de dados	205
B.2.1	Variabilidade (passo 10%): tarefa ARRUMAÇÃO - pá . .	205
B.2.2	Variabilidade (passo 10%): tarefa MANOBRA - pá . . .	206
B.2.3	Variabilidade (passo 10%): tarefa IDA - camião	206
B.2.4	Variabilidade (passo 10%): tarefa VOLTA - camião . . .	207
B.2.5	Variabilidade (passo 10%): tarefa DESCARGA - camião	207
B.2.6	Variabilidade (passo 5%): tarefa ARRUMAÇÃO - pá . .	208
B.2.7	Variabilidade (passo 5%): tarefa MANOBRA - pá	208
B.2.8	Variabilidade (passo 5%): tarefa IDA - camião	209
B.2.9	Variabilidade (passo 5%): tarefa VOLTA - camião	209
B.2.10	Variabilidade (passo 5%): tarefa DESCARGA - camião .	210
B.3	Tabelas de <i>output</i>	211
B.3.1	Resultados da simulação (passo 10%) – 1p3c	211
B.3.2	Resultados da simulação (passo 10%) – 2p5c	212
B.3.3	Resultados da simulação (passo 10%) – 2p6c	213
B.3.4	Resultados da simulação (passo 10%) – 3p9c	214
B.3.5	Resultados da simulação (passo 5%) – 1p3c	215
B.3.6	Resultados da simulação (passo 5%) – 2p5c	216
B.3.7	Resultados da simulação (passo 5%) – 2p6c	217
B.3.8	Resultados da simulação (passo 5%) – 3p9c	218
C	Segunda abordagem	219
C.1	Ficheiro de <i>input</i> de dados	221
C.2	Resultados da simulação (resumo)	222

D Terceira abordagem	225
D.1 Ficheiro de <i>input</i> de dados	227
D.2 Resultados da simulação	227
D.2.1 $cv = 0,00000001$	227
D.2.2 $cv = 0,075$	227
D.2.3 Diferença ($p_{cv=0,075} - p_{cv=0,00000001}$)	228
E Quarta abordagem	229
E.1 Ficheiro de <i>input</i> de dados	231
E.1.1 $0\% < cv < 5\%$ – passo 0,5%	231
E.1.2 $0\% < cv < 5\%$ – passo 0,25%	231
E.2 Resultados da simulação	232
E.2.1 $0\% < cv < 5\%$ – passo 0,5% (resumo)	232
E.2.2 $0\% < cv < 5\%$ – passo 0,25% (resumo)	233
F Quinta abordagem	237
F.1 Ficheiro de <i>input</i>	239
F.1.1 $0\% < cv < 5\%$ – passo 0,25%	239
F.2 Resultados da simulação	240
F.2.1 48 frotas – $0\% < cv < 5\%$ – passo 0,25% (resumo)	240
G Sexta abordagem	247
G.1 Tabelas de <i>input</i>	249
G.1.1 ($3\% < cv < 3,5\%$ – passo 0,0005)	249
G.1.2 ($3\% < cv < 3,5\%$ – passo 0,00025)	249
G.1.3 ($3,5\% < cv < 4\%$ – passo 0,00025)	250
G.2 Resultados da simulação	251
G.2.1 2p6c (resumo)	251
G.2.2 2p5c (resumo)	252
G.2.3 4p2c (resumo)	253

G.2.4	3p2c (resumo)	254
-------	---------------	-----

Lista de Figuras

2.1	Sistema - redefinição de fronteiras	27
2.2	Sistema - aparecimento de subsistemas	28
2.3	Histograma - tolva	35
2.4	Tolva encontrada	36
2.5	Mapa de isoproduções (a)	38
2.6	Mapa de isoproduções (b)	40
3.1	Produção <i>vs</i> <i>cv</i>	57
3.2	Gráfico evolução de <i>fo</i> e <i>P</i> , com $0 < cv < 100\%$ - passos 10% (1p3c)	59
3.3	Gráfico evolução de <i>fo</i> e <i>P</i> , com $0 < cv < 100\%$ - passos 10% (2p5c)	60
3.4	Gráfico evolução de <i>fo</i> e <i>P</i> , com $0 < cv < 100\%$ - passos 10% (2p6c)	60
3.5	Gráfico evolução de <i>fo</i> e <i>P</i> , com $0 < cv < 100\%$ - passos 10% (3p9c)	61
3.6	Gráfico evolução de <i>fo</i> e <i>P</i> , com $0 < cv < 100\%$ - passos 5% . . .	63
3.7	Gráfico evolução de <i>fo</i> e <i>P</i> , com $0 < cv < 100\%$ - passos 5% . . .	63
3.8	Gráfico evolução de <i>fo</i> e <i>P</i> , com $0 < cv < 100\%$ - passos 5% . . .	64
3.9	Gráfico evolução de <i>fo</i> e <i>P</i> , com $0 < cv < 100\%$ - passos 5% . . .	64
3.10	Gráfico evolução da <i>P</i> , com $0 < cv < 25\%$ - passos 2,5%	69
3.11	Gráfico evolução da <i>P</i> , com $0 < cv < 25\%$ - passos 2,5%	70

3.12	Gráfico evolução da f_o , com $0 < cv < 25\%$ - passos 2,5%	71
3.13	Gráfico evolução de p , com $0 < cv < 25\%$ - passos 2,5%	71
3.14	Gráfico evolução de p , com $0 < cv < 25\%$ - passos 2,5%	72
3.15	Gráfico evolução de p , com $0 < cv < 25\%$ - passos 2,5%	72
3.16	Gráfico evolução de p , com $0 < cv < 25\%$ - passos 2,5%	73
3.17	Gráfico P vs p (incluindo cv), com $0 < cv < 25\%$ - passos 2,5%	73
3.18	Mapa de isolinhas de diferença de p -144 frotas.	76
3.19	Gráfico P vs p (incluindo cv), com $0 < cv < 5\%$ - passos 0,5%	77
3.20	Gráfico cv vs p , com $0 < cv < 5\%$ - passos 0,5%	79
3.21	Gráfico P vs cv , com $0 < cv < 5\%$ - passos 0,5%	80
3.22	Gráfico P vs cv , com $0 < cv < 5\%$ - passos 0,5%	81
3.23	Gráfico p vs cv , com $0 < cv < 5\%$ - passos 0,5%	81
3.24	Gráfico p vs cv , com $0 < cv < 5\%$ - passos 0,5%	82
3.25	Gráfico p vs cv , com $0 < cv < 5\%$ - passos 0,5%	82
3.26	Gráfico p vs cv , com $0 < cv < 5\%$ - passos 0,5%	83
3.27	Gráfico f_o vs cv , com $0 < cv < 5\%$ - passos 0,5%	84
3.28	Gráfico f_o vs cv , com $0 < cv < 5\%$ - passos 0,5%	85
3.29	Esquema cromático 5 casos, 48 frotas	90
3.30	Representação "3/4D" 5 casos, 48 frotas	91
3.31	Representação "3/4D" caso 1, 48 frotas	92
3.32	Representação "3/4D" caso 2, 48 frotas	92
3.33	Representação "3/4D" caso 3, 48 frotas	93
3.34	Representação "3/4D" caso 4, 48 frotas	93
4.1	Gráfico P vs p , com $3\% < cv < 3,5\%$ - passos 0,05%	98
4.2	Gráfico P vs p , com $3\% < cv < 3,5\%$ - passos 0,025%	99
4.3	Gráfico P vs p , com $3\% < cv < 3,5\%$ - passos 0,05% e 0,025%	100
4.4	Gráfico P vs p , com $3\% < cv < 3,5\%$ - 4 casos	104
4.5	Gráfico P vs p , com $3\% < cv < 3,5\%$ - 4 casos	105
4.6	Gráfico função objectivo com $3\% < cv < 3,5\%$ - 4 casos	106

4.7	Gráfico $stfb$ vs $stfp$, $cv = 3,200\%$	112
4.8	Gráfico P vs p , $cv = 3,200\%$	116
4.9	Gráfico P vs $stfb$, $cv = 3,200\%$	116
4.10	Gráfico P vs $stfp$, $cv = 3,200\%$	117
4.11	Gráfico P vs $stfp$ vs $stfb$, $cv = 3,200\%$	118
5.1	Gráfico P vs p , $2,5\% < cv < 5\%$ 2p6c - 6 series	127
5.2	Gráfico P vs p , $2,5\% < cv < 5\%$ 4p6c - 6 series	129
5.3	Gráfico P vs p , $2,5\% < cv < 5\%$ 5p6c - 6 series	130
5.4	Gráfico tarefa crítica	132
5.5	Gráfico tarefa crítica	132
5.6	Gráfico tarefa não crítica	133
5.7	Gráfico tarefa não crítica	133
5.8	Gráfico P vs p , $2,5\% < cv < 5\%$ 3p5c - 6 series	135
5.9	Gráfico P vs p , $2,5\% < cv < 5\%$ 7p7c - 6 series	136
5.10	Mapa de iso-produções ($cv=2,5\%$)	137
5.11	Mapa de iso-produções ($cv=5\%$)	138
5.12	Mapa de iso-produtividades ($cv=2,5\%$)	139
5.13	Mapa de iso-produtividades ($cv=5\%$)	140

Lista de Tabelas

3.1	Tabela do degrau	75
5.1	Tabela de produções	134

Capítulo 1

Nota Introdutória

*“Nunca gostei de Júlio Verne,
por acreditar que o real era sempre mais
fantástico que a fantasia”*

Bruce Chatwin

Neste capítulo introdutório pretende-se enquadrar o leitor no cenário seleccionado como objecto do estudo que agora se apresenta. É feita uma breve análise comparativa de dois tipos de transporte mineiro – contínuo e por unidades móveis – salientando-se as vantagens do segundo, e apresentando-se, ainda, algumas das suas peculiaridades.

1.1 Transporte mineiro

O presente trabalho centra-se num aspecto particular da indústria extractiva, no caso específico das explorações a céu-aberto. O termo *indústria extractiva* refere-se a uma grande variedade de procedimentos que vão desde a prospecção até à entrega dos produtos ao consumidor, passando pela extracção e tratamento da matéria prima dita natural.

Para realçar a importância fulcral das matérias primas minerais não só ao longo dos tempos, mas como motor do desenvolvimento tecnológico da actual sociedade, basta talvez deixar aqui uma pequena ideia da diversidade dos materiais abrangidos pelo sector extractivo, quer quanto à sua natureza quer no que se refere à sua utilização. Basta, para esse efeito, parar por momentos de escrever e olhar à minha volta: praticamente tudo o que se encontra dentro deste gabinete teve um dia origem numa exploração mineira: desde a parte edificada – tijolos, betão, gesso, condutas, material isolante, vidro, caixilhos, tintas, lâmpadas e acessórios eléctricos; até ao seu conteúdo – material de escritório, todo o equipamento informático, o rádio, o telefone, o sistema de aquecimento, os móveis metálicos, enfim, até no fabrico do papel são utilizadas matérias primas minerais.

Foi já introduzido o termo *exploração a céu-aberto*; torna-se, pois, imperioso definir exploração, como sendo a fase posterior à prospecção (detecção e estudo minucioso da localização, composição, tamanho e configuração da matéria a explorar) e aos estudos de viabilidade técnico-económica; e que compreende a preparação e extracção do minério da crosta, bem como posteriores tratamentos

conducentes à sua utilização como matéria prima mineral.

A exploração pode ser feita de forma subterrânea – por túneis e galerias; por recurso a perfurações – a exploração dos hidrocarbonetos, como exemplo típico; ou a céu-aberto – quando as escavações são realizadas ao ar livre, como nas pedreiras e minas a céu aberto.

Nas explorações a céu-aberto, e após a retirada do material superficial que, regra geral, não tem características próprias que permitam o seu aproveitamento, principia-se a extracção da matéria-prima. Quando se trata de uma rocha dura, esta operação rotineira consiste em desagregar parte desse maciço, geralmente por recurso a explosivos. Após esta operação – denominada de desmonte – é necessário carregar o material desagregado e colocá-lo num sistema de transporte que o retire da frente de trabalho e o encaminhe para local onde possa receber um primeiro tratamento.

O sistema de transportes pode ser do tipo contínuo ou descontínuo. No primeiro caso o material é levado desde a frente de desmonte através de um sistema ininterrupto que, nas explorações a céu aberto, é geralmente um sistema de telas ou correias transportadoras. No caso de operação de transporte de forma cíclica, existem máquinas de operação individualizada que levam o material da frente de maneira independente.

A utilização de meios contínuos de transporte está condicionada à inclinação dos taludes ou aos desníveis que tem que vencer; para além de vincular o sistema a um determinado traçado de difícil e onerosa alteração em caso de necessidade. Tem ainda a desvantagem, face ao transporte descontínuo, de, no caso de avaria, obrigar à interrupção de todo o sistema.

Na realidade, o sistema de transportes não é habitualmente considerado isoladamente, mas antes integrado num âmbito mais vasto que inclui ainda as operações de carga na frente de trabalho e de descarga no final da viagem e que se designa por *sistema de carga e transporte*, cujo estudo de alguns dos seus aspectos peculiares constitui precisamente o âmbito deste trabalho, motivo pelo qual

voltaremos, mais adiante, a este conceito.

1.2 Unidades móveis

Até à década de 1930, o transporte mineiro em explorações subterrâneas ou a céu aberto de grandes dimensões era essencialmente assegurado por recurso a ferrovias, por se tratar da solução que representava menores custos por tonelada transportada. A vantagem do transporte ferroviário, relativamente a outros métodos, é tanto mais assinalável quanto maiores os volumes a transportar e as distâncias a percorrer. Este processo apresenta, no entanto, algumas limitações quer de carácter operacional quer de investimento. A condicionante mais limitativa em termos de implementação de uma ferrovia é a necessidade de manter uma inclinação pouco acentuada – da ordem do 1%, embora possa ir a 3 ou 4% em explorações a céu aberto. O considerável capital inicial a investir condiciona igualmente esta opção a grandes reservas que, de alguma forma, assegurem explorações que se prevêem de longo prazo.

Actualmente, o transporte ferroviário perde, ainda, para explorações que movimentem grandes volumes em curtas distâncias, principalmente em se tratando de percursos de traçado inconstante.

Num sistema de transporte do tipo descontínuo existe uma conjugação de dois tipos de equipamentos móveis: as unidades carregadoras (*pás-carregadoras*, *retro-escavadoras*, entre outras), cuja função consiste, de forma muito sintética, em recolher o material previamente desmontado e carregá-lo nas unidades transportadoras (*camiónes de estaleiro* ou *dumpers*), que efectuarão a viagem até a um local onde será feita a descarga.

O sucesso da introdução de camiões de estaleiro como principal meio de transporte em meio mineiro a céu aberto, durante a década de 30, fez com que a tendência se tenha mantido até aos dias de hoje, favorecendo o aparecimento de pás e de camiões de diversificadas características e capacidades. Existem camiões

com reboque, sem reboque, de descarga lateral, pelo fundo ou de retaguarda, com capacidades que variam das 15 às 350 toneladas.

Apesar da enorme versatilidade de manobra dos camiões quando comparados com o transporte ferroviário, devem ser definidas e construídas pistas próprias para a movimentação das unidades de transporte, tendo em vista a perfeita interacção e optimização das diferentes actividades, bem como a preservação dos equipamentos. Desta forma, de entre os diferentes factores a considerar na análise dos equipamentos, salienta-se o comprimento dos trajectos a cumprir, o grau de inclinação das rampas ascendentes e descendentes, a distância de visão relativamente a equipamentos móveis e a outros eventuais causadores de imprevistos, a compactação e resistência dos materiais do tapete de rodagem, bem como a necessidade de uma manutenção constante das pistas.

Na escolha dos equipamentos, para além das dificuldades de selecção de tonelagem e frotas, é necessário considerar as características das pás, no que se refere à versatilidade de manobras necessárias à realização da operação de carga, e das características dos camiões, no que se refere à versatilidade de manobras de parque para carga e descarga; bem como consequente tempo necessário para realizar qualquer das manobras. As velocidades atingidas pelos dumpers nas viagens em carga e em vazio – ascendentes e descendentes, que influenciam primordialmente os tempos de viagem, são igualmente factores preponderantes de análise e escolha, mas não devem ser considerados separadamente, antes em conjunção com as características – existentes ou a definir – das pistas.

1.3 Ao cronómetro

Quando se programa o funcionamento de uma exploração mineira a céu-aberto, o propósito último é o da produção de matéria prima natural; e a finalidade de todos os intervenientes do processo geral é a de que contribuam para esse mesmo objectivo.

No que ao sistema de carga e transporte diz respeito, o ideal seria que cada máquina desempenhasse de forma ininterrupta as tarefas para as quais foi programada. Todavia, o que na realidade acontece é que ao conjunto das actividades deliberadas é necessário acrescentar uma série de outras actividades – não intencionais, que se traduzem na existência de tempos em que os equipamentos param a sua actividade, por impedimentos vários. Se, por exemplo, quando um camião regressa de uma viagem e se pretende posicionar para que seja carregado por uma pá-carregadora, encontra a totalidade das pás a carregar outros camiões, não lhe resta outra possibilidade senão integrar ou constituir uma fila de espera e aguardar que uma pá fique livre para o carregar. Essa actividade – de espera – do camião é não intencional, porém inevitável.

Numa actividade cíclica como é o sistema descontínuo de carga e transporte são inúmeras as situações em que um equipamento pode ser forçado a interromper temporariamente a sua actividade¹.

No *ciclo da pá*, cujas actividades deliberadas consistem em arrumar, num montículo, o material necessário para carregar um camião e, em seguida, proceder à operação de carga, pode surgir uma situação em que após a actividade de arrumação não haja nenhum camião disponível para ser carregado; aparecendo, desta forma, uma actividade não intencional que consiste numa paragem forçada da actividade da pá. O ciclo fica, então, mais correctamente definido como a sequência ordenada das seguintes actividades: *arrumação, paragem e carga*.

Uma questão pertinente é levantada quando se questiona se a paragem existe sempre num ciclo de uma pá-carregadora. Daí resulta a distinção entre *ciclo mínimo da pá* – que é constituído apenas por arrumação e carga – e *ciclo efectivo da pá* – quando se acrescenta a paragem entre as actividades de arrumação e de carga.

Em termos de programação, a solução passa por salientar, relativamente ao

¹A essa interrupção temporária referir-nos-emos ao longo deste documento como *tempo de espera* ou *tempo de inactividade*

conceito de *ciclo da pá*, o conceito de *tempo total de ciclo da pá*, que consiste no somatório de tempos necessários à pá para completar um ciclo que se inicia com uma determinada actividade e que termina quando esta se situa para repetir idêntica operação (no caso de não haver paragem, a essa actividade – não intencional, porém prevista – é atribuído um tempo de duração nulo).

Com o *ciclo do camião* passa-se um situação análoga à do ciclo da pá. As actividades intencionais consistem em: *viagem de ida*, *descarga*, *viagem de regresso* e *carga*. Contudo, de acordo com o que foi já exemplificado, pode haver paragens forçadas, quer junto à zona de carga, quer junto à zona de descarga. Desta forma, pode considerar-se como *ciclo mínimo do camião*, a realização de forma encadeada das quatro operações deliberadas que acabam de ser referidas, e como *ciclo efectivo do camião* a sequência: *viagem de ida*, *paragem*, *descarga*, *viagem de regresso*, *paragem* e *carga*.

O *tempo de espera* de um camião, que ocorre quando o mesmo tem necessidade de aguardar junto à zona de carga ou de descarga, devido à falta de sincronização do sistema global de carga e transporte, pode ser consequência de um ou mais dos seguintes factores:

- sobredimensionamento da frota, apresentando-se esta com excesso de camiões relativamente ao número de unidades de carga existentes;
- engarrafamentos provocados pela heterogeneidade de frotas constituídas por camiões rápidos e lentos;
- desajuste do equipamento, que acontece quando o sistema de transportes é constituído por equipamentos de capacidades e características diversas, o que resulta em tempos operativos muito distintos (com principal incidência no que às operações de carga e à viagem dizem respeito);
- imponderáveis de carácter atmosférico, como chuva e gelo, que influenciam os tempos de viagem;

- desempenho inconstante por parte dos manobreadores;
- subdimensionamento da tolva²;
- necessidade de aguardar que as unidades carregadoras concluam tarefas de “arrumação” (recollecção de blocos dispersos e afastamento de matacões);
- encravamento do britador³.

Quanto aos *atrasos operacionais*, podemos classificá-los em fixos (ou rotineiros) e variáveis, sendo que os primeiros podem ser antecipadamente previstos e cronometrados, uma vez que se prendem com actividades rotineiras como a mudança de turnos, a inspecção periódica e o abastecimento dos equipamentos de carga e transporte e o rebentamento de pegas⁴. Por este motivo são habitualmente excluídos do tempo de ciclo do camião.

Os *atrasos variáveis* não são, normalmente, previsíveis quer quanto ao tempo quer quanto à respectiva duração, pois estão relacionados com imponderáveis diversos como por exemplo a desobstrução ou reparação de emergência da via, ou ainda a necessidade de arrumação da área de carga ou de um ocasional taqueio⁵. Neste contexto, é habitual englobar estes atrasos no tempo de ciclo da unidade transportadora.

² A tolva é o recipiente destinado a receber o material proveniente da descarga de um camião.

³ O britador é um equipamento que se encontra a jusante da tolva e que tem como função reduzir a granulometria do material proveniente da frente de desmonte. Em meio mineiro é também utilizado o termo *primário* para definir este primeiro de diversos estágios de cominuição sofridos pela matéria prima, ao longo do processo de tratamento.

⁴ A *pega de fogo* é o instante em que se dá o rebentamento, geralmente sequencial, de uma série de cargas explosivas previamente introduzidas em furos efectuados no maciço rochoso, de acordo com um *diagrama de fogo* antecipadamente calculado; e que tem a dupla função de arrancar um determinado volume de rocha e de fragmentá-lo, por forma a poder ser carregado e transportado.

⁵ Quando, após a pega de fogo, surge um ou mais blocos de dimensões tais que impeçam a sua carga por parte da pá-carregadora, é necessário proceder à sua fragmentação, por meios mecânicos – com a instalação de um martelo picador na lança de uma retro-escavadora – ou por recurso a explosivos – geralmente fazendo-se apenas um pequeno o furo e introduzindo somente uma carga explosiva. Uma vez que este procedimento é efectuado na frente de trabalho, inviabiliza ou condiciona, temporariamente, o normal funcionamento do sistema de carga.

Em face do que acaba de ser dito, considera-se como *tempo total de ciclo de um camião* o somatório de tempos necessários ao camião para completar um ciclo que se inicia com uma determinada actividade e que termina quando este se volta a posicionar para repetir idêntica operação. De uma forma mais detalhada, será o somatório dos tempos necessários ao desempenho ordenado das seguintes actividades: manobra na zona de carga para que possa ser carregado, carregamento por parte da unidade de carga, viagem em carga, espera na zona de descarga, manobra junto à tolva e respectiva descarga, viagem em vazio, espera junto à zona de carga, e ainda todos os atrasos variáveis que possam ocorrer.

1.4 Frotas

Na definição dos requisitos a considerar para selecção de uma frota, é necessário entrar em linha de conta com muito mais do que a produção da unidade transportadora, ela própria variável de acordo com alguns factores supra referidos, como sejam as características e traçado das vias, as capacidades e características do equipamento de carga, para além de condicionamentos operacionais onde se incluem, por exemplo, a disponibilidade e grau de utilização dos diversos equipamentos.

Os procedimentos utilizados para a definição dos requisitos de uma frota, bem como a produção requerida pelas unidades de transporte variam desde regras muito simples até algoritmos de simulação bastante complexos.

Em todo o caso, não faz qualquer sentido seleccionar as unidades de transporte a partir de uma análise que não seja conjunta com as unidades de carga.

Uma das regras mais simples consiste em considerar que o número de camiões necessários por unidade carregadora pode ser determinado através do quociente entre o *tempo total teórico de ciclo* do camião (onde se exclui os tempos de espera, quer na zona de carga, quer na zona de descarga) e o tempo total de manobra e carga da unidade transportadora. De qualquer das formas, a perfeita definição

de uma frota óptima continua a ser um desafio, sendo que é fácil perceber-se que uma frota com excesso de camiões vai registar elevados valores nos tempos de espera dos mesmos, enquanto que uma frota com défice de unidades transportadoras implica um aumento nos tempos de espera das pás.

De qualquer das formas, a experiência diz que, à medida que as dimensões das frotas aumentam – mesmo que se suponha estarem bem dimensionadas – vai acontecendo um progressivo incremento nos tempos de espera, como reflexo das interferências operacionais que passam a existir entre as diferentes unidades móveis, indo, desta forma, influenciar decisivamente os tempos de ciclo das diferentes máquinas.

De uma forma simplista, pode afirmar-se que o número de camiões necessários para constituir uma frota é determinado não apenas em função da produção/turno requerida, mas também comparando capacidades e custos de produção de diferentes frotas, seleccionando-se aquela que oferecer a mais vantajosa relação produção vs custo produtivo.

Capítulo 2

Sistemas de Carga e Transporte

“A ciência pode ser encarada sob dois aspectos diferentes. Ou se olha para ela tal como vem exposta nos livros de ensino, como coisa criada, e o aspecto é o de um todo harmonioso, onde os capítulos se encadeiam em ordem, sem contradições. Ou se procura acompanhá-la no seu desenvolvimento progressivo, assistir à maneira como foi sendo elaborada, e o aspecto é totalmente diferente – descobrem-se hesitações, dúvidas, contradições, que só um longo trabalho de reflexão e apuramento consegue eliminar, para que logo surjam outras hesitações, outras dúvidas, outras contradições. Descobre-se ainda qualquer coisa mais importante e mais interessante: – no primeiro aspecto, a ciência pode bastar-se a si própria, a formação dos conceitos e das teorias parece obedecer só as necessidades interiores; no segundo, pelo contrário, vê-se toda a influência que o ambiente da vida social exerce sobre a criação da Ciência. A Ciência encarada assim, aparece-nos como um organismo vivo, impregnado de condição humana, com as suas forças e as suas fraquezas e subordinado às grandes necessidades do homem na sua luta pelo entendimento e pela libertação; aparece-nos, enfim, como um grande capítulo da vida social humana”

Bento de Jesus Caraça

Neste capítulo é feita uma abordagem mais aprofundada ao conceito de sistema de carga e transporte, e a alguns aspectos fundamentais que deverão presidir à criação de um modelo. Faz-se o elogio da simulação por computador, e traça-se um breve panorama relativo à forma como esta ferramenta privilegiada de análise tem vindo a evoluir ao longo dos tempos.

Salienta-se a importância do método científico e justifica-se a opção por um caminho em torno do pensamento sistémico. Enquadra-se o presente trabalho como continuidade natural duma linha de investigação há muito iniciada nesta Escola e apontam-se algumas “portas” detectadas, pelas quais se espreitou e tentou entrar.

2.1 Modelação e simulação

Nas explorações mineiras, como em qualquer outra actividade industrial, as tomadas de decisão estão condicionadas por inúmeros factores externos, como sejam por exemplo as oscilações de mercado, sob as quais é difícil ter algum controlo. No entanto, existe uma grande versatilidade de selecção no que se refere a factores internos, como sejam por exemplo os métodos operacionais, os equipamentos e a gestão em geral. Na definição do que em meio mineiro se chama *sistema de carga e transporte*, e que na realidade compreende ainda uma terceira operação que é a *descarga*, alguns factores como por exemplo a localização do jazigo não podem obviamente ser alterados, mas na escolha do tipo de sistema de transporte (por ferrovia, camiões, telas transportadoras, etc.), das capacidades dos equipamentos, ou dos locais onde implementar as diversas instalações, existe uma considerável flexibilidade de actuação.

Num sistema de carga e transporte composto por pás e camiões, o tempo de carregamento de um camião e os tempos de realização das demais operações do seu ciclo de trabalho, bem como a quantidade de material a carregar são variáveis

estatísticas. O comportamento do camião em pista é função do traçado e restantes características da própria pista, bem como das condições de tráfego. Nesta ligeira amostra é possível perceber que existem considerações que, como por exemplo as dos campos da estática e dinâmica, não estão contempladas no âmbito deste trabalho, enquanto outras, como a cinemática e a estatística, são parte integrante do trabalho que agora se apresenta. Nestas condições, uma abordagem sistemática implica a construção de um modelo de simulação.

O principal objectivo da construção de um modelo é o de facilitar a percepção do modo como os diferentes factores – controláveis ou não – interactuam, e quais as combinações mais favoráveis.

A criação de um modelo pode ter por base apenas conhecimentos teóricos ou, ao contrário, contar com dados recolhidos no sistema real. Neste último caso, é necessário ter presente que a recolha de dados pode ser feita sob diversas condições operacionais, sendo que as relações empíricas entre variáveis de entrada e de saída são determinadas por recurso a técnicas estatísticas.

A simulação por computador implica a criação de um modelo computacional de um sistema real ou adaptado às minhas capacidades, objectos e meios, que tenha a versatilidade de permitir a inclusão de conhecimentos teóricos e empíricos. Pretende-se que o modelo permita simular e avaliar o comportamento do sistema ou processo sob variadas condições e cenários que possam ocorrer ao longo do tempo.

No caso presente o principal objectivo de partida prender-se-á com a minimização dos tempos de espera e consequente maximização da utilização do equipamento.

Antes da concepção de um modelo deve especificar-se o conjunto de objectivos que se pretende atingir com a exploração do mesmo. Um primeiro objectivo será o da criação de abstracções da realidade sobre as quais se consiga gerar experiências que ajudem a compreender a realidade, tendo, no entanto, presente que nenhum modelo, por mais detalhado que seja, quererá ou tentará alguma vez ex-

plicar todas as observações feitas no sistema real.

Em função das ambições pré-estabelecidas pode pretender-se que o modelo permita, por exemplo:

- extrair inferências acerca de sistemas inexistentes, sem que seja necessário construí-los, e fazer alterações em sistemas preexistentes sem causar perturbações;
- visualizar o comportamento dum sistema em função do condicionamento duma série de variáveis;
- mostrar de que forma os diversos componentes interagem entre si e de que forma interferem no comportamento geral do sistema;
- adquirir uma visão global do sistema a partir do seu interior
- identificar áreas problemáticas específicas;
- ajudar a desenvolver políticas específicas de planeamento dos procedimentos;
- testar o resultado de possíveis alterações a introduzir no sistema, antes da sua implementação;
- melhorar a eficiência/produktividade do sistema.

Apesar do elogio da modelação, em consequência das enormes contrapartidas que esta pode oferecer, dever-se-á ter presente que um modelo nunca permitirá:

- otimizar sozinho um sistema. Ele apenas poderá dar resposta a conjecturas;
- fornecer informações precisas baseadas em dados imprecisos ou incompletos;

- descrever características do sistema que não foram especificamente modeladas;
- resolver problemas. Ele apenas fornece informações que podem ajudar a tomar decisões;

2.1.1 Lógica de programação

Os modelos de simulação por computador obedecem a uma lógica de programação que não é mais do que um conjunto de regras que regulam o objecto, decidindo o que pode e o que não pode ser executado durante a operação do mesmo, e quais as sequências e prioridades. No presente caso – do dimensionamento de frotas de carga e transporte – um exemplo típico é o da definição lógica de prioridades. Por exemplo, se duas unidades de transporte se apresentam no mesmo instante num local de passagem estreita, é necessário que estejam definidas prioridades – quem passa primeiro? A que vai carregada, a que vai vazia, a que vai a descer, a que vai a subir ou, talvez muito ambicioso, aquela que se prevê não ficar em fila de espera quando chegar ao próximo local de operação. A nível de exemplo, cita-se as disciplinas FIFO (first in first out) que, em termos de fila de espera, significa que a unidade de transporte que está há mais tempo à espera é a primeira a ser carregada ou, alternativamente, LIFO (last in first out) que indica que o camião que mais recentemente chegou à fila de espera deverá ser o primeiro a sair carregado.

2.1.2 Evolução histórica

A simulação por computador é uma ferramenta muito poderosa de análise de processos, que tem vindo a ser utilizada regularmente desde a década de 1960, com vista a permitir compreender melhor as diversas operações mineiras, das quais destacamos os sistemas de carga e transporte.

De acordo com John Sturgul¹, uma das primeiras simulações em computador

¹Sturgul, J.R., 2001, "Modeling and Simulation in Mining – Its Time Has Finally Arrived", The Society for Modeling and Simulation International, May 2001 issue, San Diego, California –

foi efectuada por Karsten Rist² em 1961, precisamente no campo da engenharia de minas, e representava o sistema de transportes em cada nível de uma mina subterrânea de molibdénio, onde as vagonetas cheias tinham de enfrentar dois locais com fila de espera: um primeiro onde aguardavam por uma via livre e, em seguida, junto ao primário, para que pudessem descarregar. O objectivo era o de averiguar quais as causas e em que condições se processava um fenómeno previamente detectado – a constatação de que à medida que se ia aumentando o número de vagonetas, a produção ia aumentando até eventualmente atingir um patamar. O modelo provou que o fenómeno – de saturação ou congestionamento – existia.

Após aquele investigador, outros se lhe seguiram, simulando sistemas de carga e transporte quer em minas subterrâneas quer em explorações a céu aberto. Falkie e Mitchell³ mostraram como incorporar métodos de simulação de Monte Carlo⁴ em modelos estocásticos de simulação mineira. Nestes trabalhos foram secundados por Morgan e Peterson⁵ que mostraram como construir um modelo de simulação estocástica dum sistema de operações numa mina a céu aberto, com base no conhecimento do nível de produção e dos tempos de viagem, carga e descarga. Após calibrado, este modelo serviu para determinar a dimensão correcta da frota, em função duma produção óptima conjugada com um custo mínimo por tonelada de minério extraído.

Um outro exemplo numa simulação pioneira e bem sucedida foi a criação por

USA.

²Rist, K. A., 1961, "Computer Simulation for Solution of a Mine Transportation Problem", in *Mining World*, Vol.14, N.12, Dec. 1961, pp.19-22, S. Francisco – USA. Artigo também apresentado sob o título "The Solution of a Transportation Problem by Use of a Monte Carlo Technique", in *Proceedings of the 1st APCOM*, pp.L2.1-L2.15, University of Arizona, Tucson – USA.

³Falkie, T. V., e Mitchell, D. R., 1963, "Probability Simulation for Mine Haulage Systems", *The Society of Mining Engineers*, vol. 226, Dec. 1963, pp 467 - 473.

⁴Entende-se que um método de simulação tem por base a técnica de Monte Carlo, quando se baseia na geração aleatória de valores obtidos a partir de leis matemáticas de distribuição, construídas a partir de uma colecção de valores obtidos no espaço real.

⁵Morgan, W. C., e Peterson, L. L., 1968, "Determining Shovel-Truck Productivity", *Mining Engineering*, Feb. 1968.

parte de Cross e Williamson⁶ dum modelo de simulação dum sistema de carga e transporte numa mina de cobre no sudoeste dos Estado Unidos da América. O objectivo foi o de testar se era possível gerir, a cada instante, a distribuição dos dumpers pelas pás, encaminhando-os para a pá mais favorável, no sentido de fazer diminuir os tempos de espera na zona de carga.

A série de workshops levados a cabo pela Universidade do Arizona viria a estar na origem, em 1970, da formação da APCOM⁷ internacional (Applications of Computers and Operations Research in Mining Industry), com a subsequente realização dos respectivos congressos um pouco por todo o mundo.

2.1.3 Linguagens e *softwares*

Desde os anos 60 que tem vindo a ser utilizadas linguagens de simulação de fenómenos discretos, em cima das quais foram sendo desenvolvidos *softwares* específicos para simulação de operações típicas das actividades mineiras. Alguns desses exemplos são: ARENA, CINEMA, GPSS, GASP, SIMSCRIPT, SIMULA, SLAMSYSTEM. Apesar da boa aceitação que estes programas informáticos tem a nível industrial, regra geral funcionam mais como ferramenta de controlo do sistema e de apoio à gestão/decisão do que propriamente como ferramenta de investigação. A sua utilidade prende-se essencialmente com a facilidade com que permitem regular o sistema a partir da informação quantitativa ou qualitativa dos dados de saída, sempre com base no mesmo tipo de dados de entrada. Isto é, são regulados para a introdução de valores de determinadas variáveis e consequente débito de valores de variáveis de saída. O que varia são apenas os valores dos *inputs* e *outputs*, e não o tipo de *inputs* e *outputs*.

A sua utilização deixa de ter interesse a partir do momento em que se pretende simular alterações ao sistema, por via da introdução e/ou retirada de variáveis. Quando se pretende testar de que forma o sistema reage em face de diferentes

⁶Cross, B. K., e Williamson, G. B., 1969, "Digital Simulation of an Open-Pit Truck Haulage System", 1969 APCOM, Salt Lake City, pp 385 - 400, pub. by SME of AIME.

⁷<http://www.smenet.org/education/apcom/index.cfm>

condições de funcionamento, não é possível utilizar estes *softwares*, porque funcionam em regime de “caixa negra”, não permitindo que se entre na sua estrutura de funcionamento e se faça as alterações pretendidas.

2.2 Método

Ao encararmos a representação matemática como ferramenta de suporte ao pensamento, podemos considerá-la como a linguagem, por excelência, da ciência. Ambas – matemática e ciência – podem ser entendidas como um encadeado lógico de proposições verdadeiras, conducentes a uma verdade que pode ser demonstrada ou experimentada.

A busca e construção deste encadeado pressupõe a selecção e aplicação de um método, isto é: de um processo ou técnica racional conducente ao conhecimento ou demonstração da verdade.

Define-se um conjunto de processos acerca dos quais é possível conhecer determinadas realidades, e ordenam-se aqueles de modo a serem cumpridos de forma hierarquizada, constituindo, assim, o caminho a seguir.

Na base do estabelecimento de um método está a formulação de uma questão ou problema que vai ser objecto de análise e sobre o qual se vai raciocinar, com vista a conhecê-lo pormenorizadamente.

O método científico pode conduzir ao conhecimento prático que permita a previsão e controlo de fenómenos ou processos. No entanto, o próprio caminho percorrido é que assume primordial importância pois, ao poder ser partilhado e transmitido, independentemente do seu conteúdo, permite atestar o grau de confiança que se pode ter nele.

2.2.1 Pensamento sistémico

A abordagem seleccionada para a definição do método científico a seguir na condução do presente trabalho baseou-se no carácter sistémico que tem vindo a ser

utilizado desde que na década de 1940 Bertalanffy⁸ – fortemente influenciado por Whitehead⁹ e por Bogdanov¹⁰ – tentou combinar vários conceitos do pensamento sistêmico e da biologia organizacional numa teoria formal dos sistemas vivos, acabando por dar corpo à Teoria Geral dos Sistemas¹¹. Trata-se de uma teoria de visão interdisciplinar, capaz de transcender os problemas exclusivos de cada ciência – por via da descoberta de analogias comportamentais – e fornecer princípios e modelos gerais para todas as ciências envolvidas, de modo a possibilitar que as descobertas vindas a lume num determinado ramo do saber possam ser partilhadas pelas demais ciências.

Esta disciplina, que aborda o mundo dos sistemas de forma interligada e global, veio contrariar a perspectiva analítica de Descartes¹², que consistia em desmembrar os fenómenos complexos, com o objectivo de compreender o todo a partir das propriedades das suas partes.

A essência deste novo pensamento – sistêmico – prende-se com a percepção de que as propriedades das partes não são intrínsecas, apenas podendo ser entendidas a partir da organização do todo; isto é: um sistema não pode ser compreendido apenas pela análise separada e exclusiva de cada uma das suas partes – "*O todo*

⁸Karl Ludwig Von Bertalanffy – biólogo alemão (1901-1972).

⁹Alfred North Whitehead – matemático e filósofo inglês (1861-1947). Na década de 1920 formulou uma filosofia fortemente orientada em termos de processo. Em colaboração com o seu ex aluno de Cambridge, o matemático e filósofo britânico Bertrand Russell, escreveu os três volumes de *Principia Mathematica* (1910-1913), uma das maiores obras sobre lógica e matemática.

¹⁰Alexander Bogdanov – cientista, filósofo, economista, médico, novelista, poeta e marxista russo (1873-1928). Desenvolveu uma teoria de carácter sistêmico para tentar explicar os princípios organizacionais dos seres vivos, que tentou converter numa Ciência Universal da Organização, a que deu o nome de Tectologia.

¹¹"I seem to have come to much the same conclusion as you have reached, through approaching it from the direction of economics and the social sciences rather than from biology – that there is a body of what I have been calling general empirical theory, (or general systems theory, in your excellent terminology) which is of wide applicability in many different disciplines. I am sure there are many people all over the world who have come to essentially the same position that we have, but we are widely scattered and do not know each other, so difficult is it to cross the boundaries of the disciplines". Escreveu Kenneth Boulding a Bertalanffy, após ler um artigo deste. Citado em: <http://bertalanffy.iguw.tuwien.ac.at/sites/gst.html>

¹²René Descartes – filósofo francês (1596-1650). Considerado o pai da filosofia moderna. Põe em causa todo o saber adquirido, através da dúvida metódica, e chega à certeza da sua existência como ser pensante: "Penso, logo existo".

é mais que a soma das suas partes"¹³. Na prática, a transição do pensamento analítico para o pensamento sistémico, consiste na inversão da relação entre o todo e as partes.

A complexidade de um sistema depende essencialmente da forma como as suas partes interagem, pelo que deve ser tratado como um todo multifacetado, visando delinear fronteiras, relações internas e externas, estruturas e leis; feito por recurso a procedimentos teóricos e práticos que, ao reconhecer essa mesma complexidade, impeçam uma abordagem reducionista.

Um sistema é estudado, não através do isolamento de cada um dos seus elementos, mas antes através da procura de ligações e interacções, de forma a conduzir a uma percepção global. Cada elemento está de tal forma relacionado com os restantes, que uma alteração no seu comportamento implica mudanças nos restantes e, conseqüentemente, na unidade global do sistema. A forma como os diferentes elementos se relacionam faz com que apareçam qualidades, inexistentes em cada um deles quando analisados isoladamente.

Ao avançarmos para além do paradigma Newtoniano linear causa-efeito no estudo de modelos de comportamento e de inter-relações sistemáticas entre as partes de um sistema, obtemos uma mais profunda compreensão da própria natureza e de como ela funciona. Essa compreensão permite-nos trabalhar com o sistema e não contra ele, ao mesmo tempo que possibilita o desenvolvimento de intervenções baseadas na previsão atempada dos acontecimentos.

A abordagem sistémica pressupõe que um sistema possa ser definido como um conjunto de elementos em interacção ordenada, que possui atributos e se rege por princípios e leis gerais que podem não estar presentes em nenhum dos componentes em particular. Propriedades e comportamentos que resultam justamente da combinação e interacção dos elementos – perspectiva negligenciada pela pretérita abordagem cartesiana.

¹³Christian Freiherr Von Ehrenfels – psicólogo, filósofo e dramaturgo austríaco (1859-1932). Autor da frase supra-referida.

No entanto, apesar do objectivo passar pela identificação dessas características abrangentes, importa salientar que constituiu igualmente uma perspectiva desta metodologia a ênfase a dar aos aspectos peculiares dos objectos ou eventos singulares, sobretudo aos que decorrem das propriedades gerais do sistema, mais do que do seu conteúdo específico.

Da mesma forma que a concepção teleológica foi rejeitada por Galileu, em benefício da concepção mecanicista, a ruptura relevante imposta pela teoria dos sistemas é a de que o mecanicismo – fragmentador dos sistemas e da própria ciência – se tornou definitivamente desajustado como modelo universal.

“Existe uma conhecida história hindu sobre os esforços de seis homens cegos para descrever um elefante. Assim, ao que segurou uma perna, o animal pareceu o tronco de uma árvore. O que tocou a cauda pensou que estivesse segurando uma corda. A tromba do elefante pareceu, a outro, uma cobra em movimento, enquanto que o que examinou o dente declarou que o animal se assemelhava a uma espada afiada. Houve, no final, muita divergência porque cada um deles julgava saber o que o elefante realmente era. O problema, naturalmente, era que cada indivíduo estava limitado por sua perspectiva única e incompleta. Além disso, mesmo o contador da história ficou decepcionado, porque enquanto sentia que estava observando toda a situação, aparentemente falhou em perceber o seu próprio papel como elemento intrincado neste sistema elefantino hindu.”

W. P. Woodworth (1968)¹⁴

Um desafio mais ambicioso e abrangente é lançado pelo pensamento sistémico a quem se ocupe da análise duma determinada realidade. Ele incita ao envolvimento pessoal do investigador, lançando-lhe o repto de recusar a adopção de um

¹⁴in Bertalanffy, L.V., e outros, 1976, “Teoria dos Sistemas”, Editora da Fundação Getulio Vargas – Rio de Janeiro – Brasil.

papel de mero observador passivo, porquanto a forma como ele se relaciona com o mundo que pretende descrever implica uma aceitação de que este é também parte integrante do sistema. A visão não pode nunca ser totalmente exterior, o que passa necessariamente pelo reconhecimento de que é forçoso analisar a própria análise.

Sendo a abordagem sistémica uma forma de pensar acerca dos constituintes que compõem o fenómeno em estudo, movimentando-se das partes para o todo, com o intuito de averiguar as finalidades do funcionamento do sistema, denota especial capacidade para lidar com as relações dinâmicas existentes entre os diferentes elementos. “... *sendo uma concepção mental, o sistema não é independente do modelador.*”¹⁵

É justamente esta aptidão para examinar e entrosar as coisas de forma alternativa, de olhar os acontecimentos não como uma simples colecção de componentes, mas antes como um conjunto de ideias, que passa pelo estudo e avaliação das relações entre conceitos e elementos de um sistema, que constitui a mais-valia da teoria dos sistemas. A constante reavaliação da rede de ligações assume importância crítica sempre que há introdução de uma nova entidade no sistema: circunstância que afecta todos os elementos e relações, e não apenas aqueles que parecem directamente ligados com o novo cenário.

Modelo

A criação de um modelo pressupõe que o sistema em questão não possa ser satisfatoriamente avaliado por recurso a técnicas analíticas clássicas, por isso se parte para uma exploração mais complexa. No entanto, não existem linhas orientadoras específicas indicadoras da forma como se deve simular um sistema. Os atributos definidores de um modelo são tão evidentes quanto vagos. Pretende-se, por exemplo, que um modelo seja suficientemente complexo por forma a incluir todos os detalhes importantes do processo, assumindo, desta forma, uma representação válida da realidade. No entanto, pretende-se, em simultâneo, que apenas os factores

¹⁵Carvalho J. C. e outros. “Sistema: modelo conceptual de um objecto.” <http://piano.dsi.uminho.pt/jac/SI/zdocumentos/sistemas.pdf>.

intervenientes na abordagem seleccionada estejam representados.

A validação de um modelo é feita após confirmação/garantia de que este produz resultados previamente conhecidos em função de condições/circunstâncias elas próprias conhecidas, tendo, no entanto, presente que por muito detalhado que o modelo seja, nunca poderá explicar tudo o que é observado, e muito menos tudo o que acontece no meio físico.

Pretende-se que com a modelação se consiga criar abstrações da realidade nas quais se possa proceder a experiências que facilitem uma melhor compreensão dos fenómenos em estudo. A utilidade do modelo consiste precisamente em permitir experimentar configurações e regras de operação alternativas do processo, utilizando o modelo em substituição do processo real; e que se torna especialmente valioso sempre que existe inviabilidade técnica ou económica da experimentação *in situ*.

O papel da matemática

Ao olhar-se, para a teoria geral dos sistemas como um estudo de relações, facilmente se aceita que a matemática tenha um papel fundamental a desempenhar, porquanto consiste em uma linguagem que admite ser tratada como vazia de conteúdo, exprimindo apenas características estruturais.

A abordagem sistémica ocupa-se da estrutura definida pela rede de relações entre as diferentes partes do sistema, e do modo como essas relações determinam um *comportamento dinâmico* ou *evolutivo*.

Um sistema pode, sob este ponto de vista, ser entendido como um fragmento do universo que pode ser descrito, num dado instante, através da quantificação ou qualificação de um determinado número de variáveis.

O estudo da dinâmica do sistema consiste na procura do modo como as alterações do valor de cada uma das variáveis são ora reflexo ora causa das mudanças de valor de outras variáveis. Uma teoria dinâmica vai sendo construída à medida que se vão acrescentando proposições que podem ser matematicamente deduzidas.

A modelação conceptual da situação complexa em estudo – sistema – deverá proporcionar a possibilidade de efectuar previsão quanto à evolução do estado e comportamento das entidades. A descrição é feita por recurso a indicadores de desempenho: variáveis de estado. Numa óptica matemática, uma abordagem sistémica implica, então, a descrição da estrutura, do comportamento e da evolução

A *modelagem fenomenológica* apresenta-se – por oposição à *modelagem regressiva* – como a perspectiva mais evoluída da metodologia sistémica, não apenas por se basear nas correlações e interdependências entre as diversas partes do sistema, e por definir inequivocamente entradas e saídas; mas ainda porque não se satisfaz com o mero ajuste de leis teóricas; é sempre necessário explicar o porquê da escolha de determinada lei. As entradas são entendidas como variáveis independentes, o que impede a realimentação de saídas para o sistema. Em todo o caso, perante a inevitabilidade de um retorno, todo o percurso deve ser integrado no ambiente, sendo, para isso, necessário alargar o âmbito do mesmo (fig. 2.1). Os modelos fenomenológicos, ao serem desenvolvidos a partir da descrição do mecanismo do processo, associado ao grau de influência dos parâmetros físicos do mesmo, tornam-nos numa representação poderosa e realista do processo.

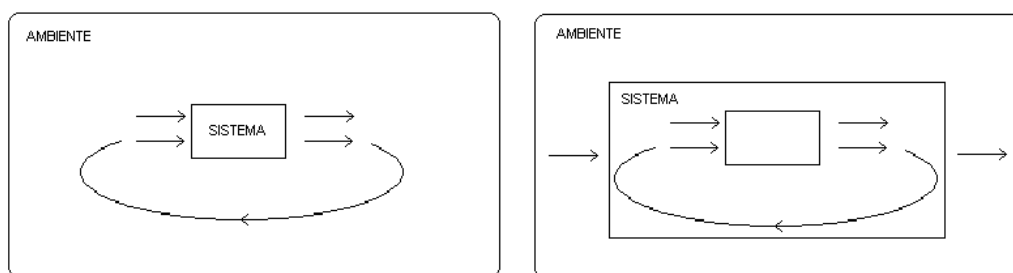


Figura 2.1: Esquema demonstrativo da alteração na delimitação de um ambiente, em face da existência de retorno.

Em oposição a esta perspectiva holística¹⁶, existia, desde Descartes uma visão reducionista da abordagem: para se controlar a complexidade do sistema,

¹⁶O holismo perspectiva que o todo tem propriedades que faltam aos seus elementos constitutivos.

decompunha-se o mesmo em partes menores, de forma a concentrar o esforço em múltiplos subsistemas mais simples que poderiam, no entanto, eles próprios não gozar da propriedade sistémica (fig. 2.2).

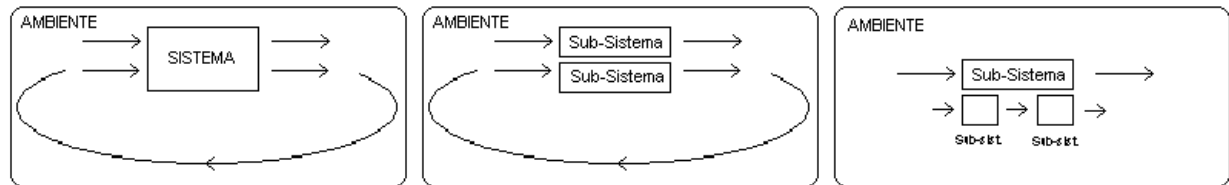


Figura 2.2: Esquema demonstrativo da redefinição de fronteiras do sistema que, na prática, levam à criação de subsistemas.

A opção passa por uma análise cuidada das alternativas ou cenários de actuação, centrada essencialmente nos fenómenos de realimentação; dado que a lei empírica que relaciona as diferentes componentes é, ela própria, falível, na medida em que, para além de o número de observações ser sempre finito, existe incerteza quanto à fiabilidade dos resultados experimentais obtidos.

2.3 Modelos estocásticos

2.3.1 Um modelo preambular

O trabalho que agora se apresenta surge como consequência natural de um esforço de equipa há muito iniciado no Departamento de Minas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e que tem vindo, ao longo dos tempos, a produzir um encadeado de resultados bastante promissores. Nesta Escola sempre se privilegiou a criação de programas abertos, que permitissem múltiplas intervenções posteriores com vista a testar diferentes cenários, não apenas por parte dos seus criadores, mas essencialmente como forma de cativar novas gerações de investigadores a debruçarem-se sobre este peculiar aspecto da actividade mineira.

Como modelo pioneiro importa referir aquele que foi criado e desenvolvido

por Miranda¹⁷, e que com assinalável sucesso simula um *sistema de carga e transporte*, segundo uma abordagem estocástica.

Em traços gerais, o modelo de Miranda [Miranda, 1986] preconiza que a cada unidade transportadora esteja atribuída uma e uma só unidade carregadora, obrigando sempre à existência de um número de pás igual ao número de camiões. Todos os camiões, bem como a totalidade das pás carregadoras têm capacidades e características idênticas, isto é, são em tudo iguais. Existe apenas uma zona de descarga – tolva – embora de capacidade infinita. O modelo pressupõe, ainda, que não existem condicionamentos de tráfego, uma vez que considera pista com largura suficiente para que o trânsito se desloque em ambos os sentidos, sem que haja qualquer tipo de interferência. A distância da zona de carga à zona de descarga é considerada idêntica para todas as unidades transportadoras.

O modelo pretende, desta forma, representar uma exploração mineira a céu-aberto, que possui um determinado número de pontos de carga, cada um deles provido de uma unidade de carga idêntica, e às quais aflui igual número de unidades transportadoras, de características semelhantes. O ritmo de chegada dos camiões processa-se de forma aleatória, sendo que cada um deles se dirige à pá-carregadora lhe foi previamente destinada e fica retido para carga durante um intervalo de tempo de duração também aleatória. Finalizada esta operação, cada unidade carregada realiza o percurso em direcção à estação de descarga, em seguida descarrega e efectua a viagem de regresso ao respectivo ponto de carregamento. A estas actividades (viagem de ida, descarga e viagem de regresso) associam-se também durações de grandeza aleatória.

O modelo prevê que, no intervalo de tempo necessário para que cada unidade transportadora cumpra um ciclo e se apresente novamente na zona de carga, a respectiva unidade carregadora efectue uma operação de arrumação de material, de duração aleatória, destinada a fazer com que a subsequente operação de carga

¹⁷Miranda, H.S.B., 1986, "Transportes Mineiros. Efeitos Peculiares da Disciplina de Fecho do Relevo", Departamento de Minas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto – Portugal.

decorra com a máxima eficácia.

Não são consideradas filas de espera das unidades transportadoras na zona de carga, uma vez que o tempo necessário a cada camião para cumprir um ciclo de viagens é sempre muito superior àquele que uma pá necessita para proceder a operações de arrumação. Pelo contrário, as pás é que registam usualmente tempos de espera enquanto aguardam a chegada das unidades transportadoras a si destinadas.

Já na zona de descarga, uma vez que é única, pode registar-se fila de espera dos camiões, regulada pela disciplina FIFO. O facto de a tolva ter capacidade infinita apenas significa que não admite paragens devido a encravamentos a jusante, tendo a limitação menor de apenas permitir a descarga de um camião de cada vez.

Embora o problema primário preconizado por Miranda [Miranda, 1986] tivesse sido o desafio do dimensionamento de tolvas, aquele autor deparou-se com outro problema que lhe provocou maior fascínio e que o fez alterar o rumo do seu trabalho. Ao testar alterações na variabilidade dos dados relativos às diferentes operações de cada equipamento, ele detectou que, apesar dos cenários de carácter mais próximo do determinismo serem aqueles a cujos gráficos de produções e produtividades se referiam como os mais profícuos, aparecem alguns casos em que os picos mais elevados para ambos os parâmetros em estudo se situavam, se bem que numa gama que se pode apelidar de próxima do determinismo, à direita dos mais baixos valores de *coeficiente de variabilidade* testados. Observou, ainda, que em número não desprezável de casos, conseguia aumentos de produção à custa de uma diminuição sensível da produtividade (ele considerou a produtividade como sendo a razão entre a produção e o tempo total de tempos de inactividade). De outra forma: nem sempre a um aumento de produção correspondia o requerido aumento de produtividade.

Esta constatação, da existência de aspectos aparentemente contraditórios ao expectável, porque discordantes do senso comum (como sendo, por exemplo, um ocasional aumento de produção associado a alguma aleatoriedade), voltariam a ser ligeiramente aflorados por Leite [Leite, 1998], e posteriormente analisados de

forma mais aprofundada no presente trabalho, como se verá adiante.

2.3.2 Dimensionamento de tolvas

O modelo construído por Leite¹⁸, e apresentado publicamente no âmbito das suas provas de Capacidade Científica e Aptidão Pedagógica, permitiu criar um algoritmo de simulação de um sistema de carga, transporte e armazenamento de materiais em tolva, associado a um dado regime de descarga dessa mesma tolva, aplicável a pedreiras a céu aberto, com vista à sua exploração, na tentativa de obtenção de parâmetros de optimização, analisando ainda a dependência destes da capacidade desse armazém.

A proposta era a de dimensionar uma tolva para uma determinada frota. O que parte logo do pressuposto de que essa mesma frota está, ela própria, bem dimensionada. O que acontece, na prática, é que para dimensionar uma frota é necessário entrar em linha de conta com a dimensão da tolva, para além da conjugação de uma série de outras variáveis (todas elas interdependentes), como sejam: a produção desejada, as capacidades de pás e camiões e o tempo necessário à realização de cada tarefa.

Em face da complexidade da proposta inicial, o autor construiu um algoritmo que permitiu verificar a evolução da variação de alguns parâmetros do sistema em função de diferentes *frotas-tipo*. Nomeadamente os tempos de espera das unidades de carga e das unidades de transporte.

A constatação de algumas conjecturas – como por exemplo que para uma dada frota, considerada estável, um aumento do número de pás implicava, simultaneamente, uma diminuição do tempo de espera na carga e um aumento do tempo de espera na descarga, para além de poder propiciar períodos de inactividade das pás – permitiu verificar a coerência do algoritmo.

Para as configurações (número de pás vs número de camiões) idealizadas, o

¹⁸Leite, A.J.M., 1990, "Simulação de Transporte e Armazenamento em Lavra a Céu Aberto. Novos critérios de dimensionamento", Departamento de Minas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto – Portugal.

primeiro modelo de Leite [Leite, 1990] permitiu concluir que a eficiência de uma tolva se pode traduzir em face da capacidade de filtrar as perturbações a montante e a jusante, medida pelo grau de dispersão dos histogramas em torno do nível médio em que a moda se situa, bem como pelo aumento da frequência dessa moda. A capacidade de uma tolva, para além de condicionar o comportamento geral do sistema de carga e transporte, é um parâmetro que interfere no seu próprio regime interno.

2.3.3 Dimensionamento de frotas

Como trabalho de doutoramento, servindo-se – apenas como inspiração – do modelo primitivo, Leite introduziu uma série de alterações/melhoramentos, a saber: enquanto que no modelo inicial o tempo de carga era um parâmetro associado ao camião, no modelo que se lhe seguiu [Leite, 1998] passou a ser associado à pá – *“o que correspondia a dizer que as pás carregadoras possuíam a mesma capacidade de balde de carga e que operavam todas em iguais condições mecânicas. Os histogramas de tempos de carga foram construídos tendo como base a recolha de sucessivos tempos de carga dos camiões, independentemente da pá que os carregasse.”*¹⁹.

A simulação da evolução da capacidade da tolva foi outro dos parâmetros que sofreu uma profunda alteração. Enquanto que no primeiro modelo, Leite considerou uma série de valores de nível ao longo do tempo e a intervalos de tempo fixos, com os quais procedeu à construção de histogramas de frequência de nível, no modelo mais recente, esses valores são gerados pela própria simulação, dando origem a um histograma, do qual o próprio programa se serve para retirar dados para a continuação da simulação, i.e., os valores da variação do nível de tolva são, numa fase da simulação, *output*, para de seguida funcionarem como *input*.

¹⁹Leite, A.J.M., 1998, “Transformação de Um Objecto da Indústria Extractiva em Sistema. Algumas Consequências”, Departamento de Minas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto – Portugal.

A própria estabilização dos dados relativos às frequências dos níveis de tolva não era testada no modelo de 1990²⁰. No modelo de 1998²¹, a estabilização dos histogramas de frequência de nível começou por ser feita por recurso a dois mecanismos: em primeiro lugar, a obrigatoriedade da classe de nível onde se encontra a moda das frequências coincidir, aproximadamente, com a classe de nível correspondente ao nível médio da respectiva tolva. Simultaneamente verificava-se se a regra de Pearson²² para análise de simetria de histogramas era satisfeita.

O que aquele autor verificou nos *histogramas de frequência de classes de níveis da tolva* foi que era impossível cumprir o critério de simetria de Pearson, porque a primeira classe – tolva vazia – tinha uma frequência muito elevada que impedia o cumprimento desse mesmo critério, pelo que ele foi abandonado, ficando como critério único de paragem (i.e., estabilização) uma moda próxima da média (isto é: da classe de nível médio da tolva).

Para além das frequências de nível da tolva, a garantia de estabilização das restantes variáveis é dada em face duma estabilização da média das médias, i.e., quando o respectivo histograma corresponder a uma distribuição normal cujos valores se situem dentro de um canal de confiança preestabelecido.

²⁰ Algoritmo que passará a ser referenciado como AL90

²¹ Algoritmo que passará a ser referenciado como AL98

²² É uma regra que tem como critério a análise do grau de enviesamento de uma curva de frequências. Quando, numa distribuição, a média, a moda e a mediana recaem sobre pontos diferentes da distribuição, a forma da curva de distribuição de frequências apresenta-se assimétrica. O critério de simetria de Pearson mede o grau de assimetria desse polígono de frequências, propondo a determinação de dois coeficientes – c_1 e c_2 .

$$c_1 = \frac{\bar{x} - Mo}{\sigma} \quad (2.1)$$

$$c_2 = \frac{3(\bar{x} - Me)}{\sigma} \quad (2.2)$$

onde: \bar{x} = média aritmética; Mo = moda; σ = desvio-padrão; Me = mediana

Os valores de c_1 e c_2 podem situar-se no intervalo: $-3 \leq c \leq 3$, embora não seja comum situarem-se fora do seguinte intervalo: $-1 \leq c \leq 1$.

O primeiro coeficiente de assimetria de Pearson tem o inconveniente de requerer a determinação prévia da moda (que depende da partição introduzida no histograma), pelo que, quando as distribuições não se apresentarem com forte assimetria, é indicada a utilização do segundo coeficiente de Pearson.

No algoritmo AL98 foi, ainda, acrescentado um número relevante de variáveis de entrada e consequentes *outputs*, imprescindíveis para as análises que pretendeu realizar. Foram, por exemplo, introduzidos os tempos de manobra unitária e capacidades de pás carregadoras, quantificando-se os tempos de carga em função das características das máquinas.

A par com este trabalho foi desenvolvido um outro por Nascimento²³, que consistiu na utilização de técnicas de investigação operacional utilizadas na análise dos resultados de uma simulação de um processo da indústria extractiva. A autora utilizou o *software* SLAMSYSTEM para simular as operações de carga, transporte e armazenamento intermédio numa exploração mineira a céu-aberto. Esse trabalho permitiu, sobre um caso de relativa complexidade, demonstrar a validade da abordagem simulacional para a identificação dos elementos críticos do processo produtivo e das respectivas relações causais.

simulações

No algoritmo AL98, numa primeira fase, Leite efectuou simulações para 144 diferentes combinações de frotas – número de pás (NP) *vs* número de camiões (NC), tendo feito variar quer NP quer NC de 1 até 12.

Os *inputs* fixos, à partida para cada uma das 144 simulações foram:

- a velocidade de descarga da tolva;
- a dimensão inicial da tolva;
- a dimensão final da tolva;
- a capacidade das pás;
- a capacidade dos camiões;

O programa gerava como *outputs* os tempos de tarefa para cada máquina.

²³Nascimento, M.N.S., 1998, "Análise de Resultados de uma Simulação de um Processo Não-Ergódico. Sobre um Exemplo da Indústria Extractiva", Universidade de Trás-Os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 1998

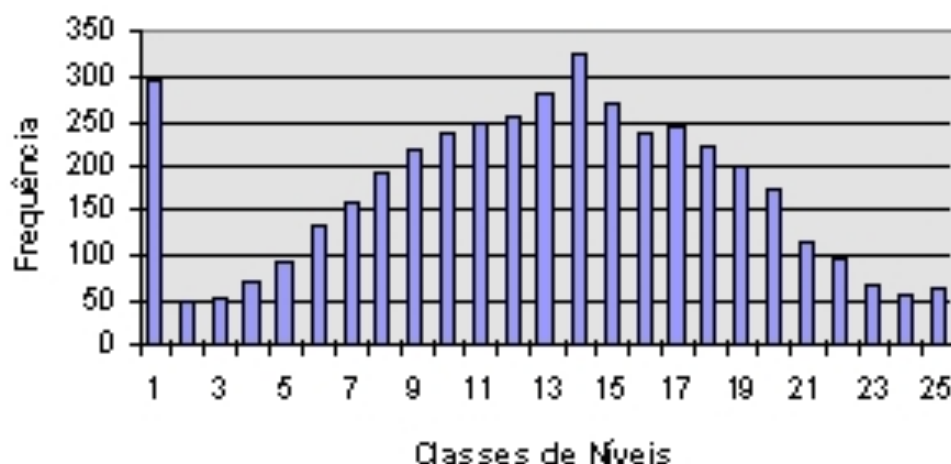


Figura 2.3: Exemplo de um histograma de frequências de níveis de tolva.

A análise das capacidades das tolvas encontradas por simulação sugere que se conclua que a dimensão da tolva nada tem a ver com a configuração da frota. Isto apesar de determinadas configurações sugerirem uma tolva óptima e outras não. A única regra prática (empírica) que se consegue extrair dos dados é a de que a capacidade da tolva parece ser em média o dobro da capacidade das unidades de transporte.

A segunda fase de simulações foi efectuada numa zona de “tolva encontrada”, e dividida em duas fases. Na primeira, fez variar as capacidades das pás e camiões, mantendo, no entanto, a relação 1:4, tendo concluído o seguinte, em face dos resultados obtidos:

- foi sempre encontrada uma tolva que cumpriu o critério de paragem;
- o tamanho da tolva não depende do número de unidades de carga e de transporte;
- a regra prática da capacidade da tolva ser o dobro da dos camiões, parece manter-se.

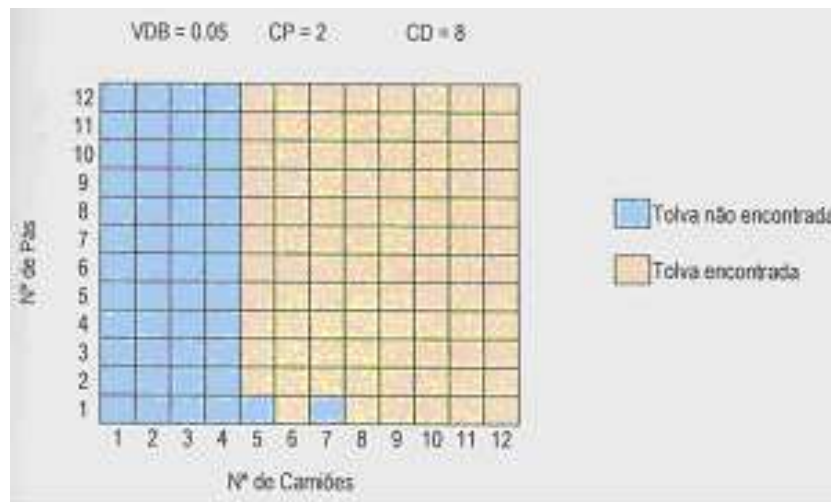


Figura 2.4: Exemplo de um mapa onde se assinala, para cada frota, a existência ou não de tolva, de acordo com o critério especificado.

Numa sub-fase, fez variar a velocidade de descarga da tolva, sendo que o programa apenas encontrou tolva em cerca de metade dos casos.

Em face dos resultados obtidos, parece legítimo perguntar: O que significa a linha fronteira entre “frotas que dão tolva e frotas que não dão”?

produção

Aceite o modelo, enquanto “dimensionador de tolvas”, passou a analisar a produção – quantidade de material que passa no britador por unidade de tempo (dia), tendo presente que os dados fixos de partida constituem limites à expansão da produção.

Naquela fase, a questão que se levantava era a seguinte: *Será que existe alguma correlação entre a produção e a linha de fronteira entre “frotas que dão tolva e frotas que não dão”?*

As conclusões obtidas em face dos resultados da simulação, pareciam apontar para que essa suposição fosse verdadeira. Atente-se no seguinte:

- independentemente da configuração, a produção atinge sempre um patamar;

- a tolva encontrada ($16m^3$) está na zona de transição para patamar;
- uma vez que após encontrada a tolva “ideal”, se passava a ter uma capacidade fixa, e que o caudal de descarga do britador é também ele fixo, conclui-se que a partir de certa dimensão da frota existem limites para a produção que são independentes da configuração desta.

Outra questão se levantou: *Será que existe alguma correlação entre a capacidade das pás e camiões e a linha de fronteira entre “frotas que dão tolva e frotas que não dão”?*

Ao concluir-se que um aumento da capacidade das pás e camiões implicava um deslocamento da linha de fronteira para a esquerda, i.e., “encontra-se tolva” com menos camiões, parecia que a questão era de resposta afirmativa.

Apesar de se constatar que a cada frota podemos associar uma determinada gama de produções, o contrário não nos é permitido concluir. Isto é, pode haver diferentes frotas a trabalhar para uma mesma gama de produções, o que equivale a dizer que existem sobreposições de valores de produção.

Aqui convém fazer um parêntesis para ressaltar que esta produção apesar de tratada como variável contínua, é função de duas variáveis descontínuas: número – inteiro – de pás e número – inteiro – de camiões. No entanto, a forma possível de relacionar cada um dos diferentes valores de produção obtidos com todas as frotas que lhes dão origem é através da elaboração de um quadro de dupla entrada no qual às abcissas corresponde o número de camiões e às ordenadas o número de pás. A cada par ordenado (x_i, y_i) corresponde um ponto que constitui uma frota, e ao qual se pode alocar uma determinada produção. O que vai acontecer é que a diferentes pontos (x_i, y_i) vão corresponder iguais produções. Pode fazer-se com que estes dados sofram um processo de regularização, que em termos práticos consiste em unir-se os pontos com iguais produções, obtendo-se, desta forma, um mapa de isoproduções (que é uma representação contínua dum fenómeno descontínuo).

Da análise do mapa de isolinhas, constata-se o seguinte:

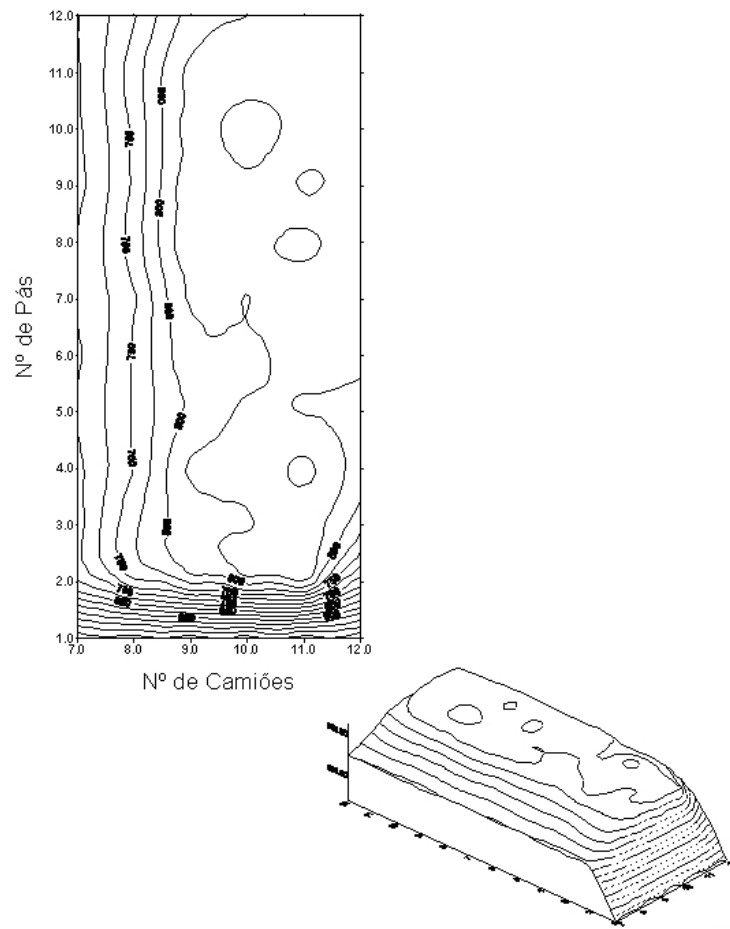


Figura 2.5: Exemplo de um mapa de isoproduções.

- não há cruzamento de diferentes isolinhas, o que confere legitimidade à representação, enquanto isomapa;
- a área em que o algoritmo não detectava nenhuma tolva corresponde à zona de menor “declive” do mapa de isolinhas, i.e., onde a variação do número de pás não interfere com a produção. O que significa que não adianta aumentar o número de pás se não houver camiões para carregar. As causas poderão eventualmente ser duas: ou o tempo de ciclo dos camiões é elevado, por via de um longo percurso ou, por outro lado, existe espera junto à descarga e, neste caso, poder-se-á concluir que a tolva está subdimensionada. Parece

legítimo avançar com a seguinte questão: Se não fosse imposto um limite à capacidade da tolva e se se encontrasse uma tolva óptima para cada frota, será que se obteria um mapa de isolinhas concêntrico?

- a área em que o algoritmo detectava tolva corresponde à zona de "planalto", i.e., de patamar;
- a transição entre as duas áreas diferenciadas corresponde à *linha de fronteira entre frotas que dão tolva e frotas que não dão*;
- existe uma segunda zona de grande “declive”, com desenvolvimento paralelo ao eixo das abcissas, e que corresponde aos casos em que não adianta aumentar ao número de camiões, pois não há quem os carregue (as pás não param de trabalhar, i.e., nunca esperam).

Importa salientar que os fenómenos que acabam de ser descritos são válidos para todas as configurações testadas (diferentes combinações de valores de capacidades de tolva, de pás e de camiões, e velocidades de descarga), embora as escalas variem.

Partindo para a análise do mapa de isoproduções, dividindo-o nas 3 áreas referidas, verifica-se que na zona de “planalto” se está em situação de frota optimizada/tolva encontrada, ao contrário do que acontece nos outros dois locais. Na zona de declive mais acentuado (próximo do eixo das abcissas) consegue-se um incremento de produção através da inserção de unidades de carga, enquanto que na zona de declive menos acentuado (próximo do eixo das ordenadas) é a inserção de unidades de transporte que propicia um aumento de produção.

Continuando a análise da produção “em cima” do isomapa, verifica-se a permutabilidade de factores, i.e., existem várias razões de alocação que possibilitam um mesmo resultado.

Deixando de lado alguns critérios, nomeadamente os de carácter económico-financeiro, as combinações mais favoráveis para cada gama de produções são

linha de crista.

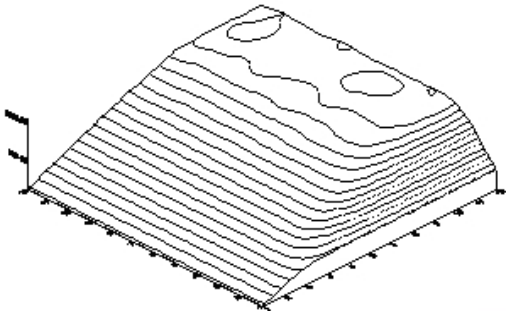


Figura 2.6: Exemplo de um mapa de isoproduções.

2.4 Modelos determinísticos

Para além dos algoritmos de carácter probabilístico, anteriormente referidos, Miranda e Leite²⁴ desenvolveram, em conjunto, uma investigação sob uma perspectiva determinística, cujo valor heurístico é reforçado pela comparação de alguns dos resultados obtidos com valores provenientes das suas simulações de carácter estocástico.

No trabalho agora referido, o dimensionamento de frotas de carga e transporte assenta numa condição de balanceamento entre unidades de carga e unidades de transporte a estabelecer mediante o sincronismo da operação; entendendo-se este como o modo organizativo que garantiria que jamais uma unidade de transporte averbasse esperas junto de uma unidade carregadora. Partia-se do princípio que cada unidade de transporte estava sempre a desempenhar uma de duas operações: carga²⁵ ou transporte. A ideia era a de um fluxo contínuo de viaturas e de material, o que implicava que a produção de cada unidade carregadora fosse igual à produção da frota de unidades transportadoras por aquela servidas. Admitia-se, desta forma, que a produção da totalidade da frota de pás era igual à produção da frota total de camiões que, por sua vez, seria igual à produção do sistema de carga e transporte (volume de material transportado da frente de trabalho até ao local de descarga).

Neste tipo de esquema de cálculo, o modo de evitar que qualquer equipamento registe tempo de paragem consiste em atribuir a todas as máquinas um rendimento unitário.

O cálculo do número de camiões a ser adstrito a cada pá era dado pelo quociente entre o *tempo de ciclo mínimo dos camiões* e o *tempo de carga* (produto entre o *número de pazadas necessárias para encher um camião* e o *tempo de ciclo mínimo da pá*). Ora, apesar de ser difícil de quantificar, pode afirmar-se sem

²⁴Miranda, H.S.B. e Leite, A.J.M., 1996, “Análise de Sistemas de Carga e Transporte: Uma Abordagem Determinística”, Actas das *IIIas Jornadas Técnicas da AIPGN*, Porto – Portugal.

²⁵Leia-se: “a ser carregada”.

hesitações que será baixíssima a probabilidade de se obter, como resultado desta operação, um número inteiro. O encadeado de implicações está à vista: adopta-se, para número de unidades de transporte, o número inteiro imediatamente superior ao valor obtido e, para que a equação traduza uma igualdade verdadeira, surge um novo valor para o tempo de ciclo – o *tempo de ciclo efectivo*.

Quer isto dizer que, do facto de se conjugar variáveis contínuas – tempo – com variáveis discretas – número de unidades de transporte – decorre a impossibilidade de eliminar os tempos de inactividade; mesmo admitindo a mais do que improvável hipótese de que seriam perfeitamente controláveis todos os factores que tornam variáveis os tempos de actividade.

Em face da conclusão anterior, para obviar a este problema, Miranda e Leite [Miranda e Leite, 1996] abandonaram aquela perspectiva mais simplista e passaram a considerar a possibilidade de rendimentos não unitários, e mesmo diferentes para pás e camiões; tendo chegado à seguinte relação fundamental de equilíbrio de um sistema de carga e transporte:

$$\frac{N_c}{N_p} = \frac{TCE_c}{TCE_p} \quad (2.3)$$

em que:

N_c é o número de camiões

N_p é o número de pás

TCE_c é o tempo de ciclo efectivo de um camião

TCE_p é o tempo de ciclo efectivo de uma pá

O algoritmo elaborado era de carácter recorrente, na medida em que os valores se iam acercando da situação desejável por meio de aproximações sucessivas. Vejamos então: a partir de um valor desejado para a produção e de uma capacidade conhecida da caixa dos camiões, era determinado o número total de cargas necessárias à realização daquela produção; inferindo-se, seguidamente, um valor

(fictício porque não inteiro) para N_c e para N_p . Surge, pois, a necessidade de calcular TCE_c e TCE_p , que só pode ser feito de modo recursivo. Como todo o algoritmo está estruturado desta forma, o novo passo será o de recalcular valores (fictícios) para N_c e para N_p e repetir todo o procedimento tantas vezes quantas as necessárias até que a diferença entre a produção das pás seja igual à produção dos camiões; considerando-se, nessa altura, que os valores dos ciclos efectivos estão ajustados.

A validação do modelo, por recurso à comparação com os resultados obtidos em simulações de carácter probabilístico – nas quais a variabilidade dos tempos das diferentes actividades, bem como a possibilidade de constrangimentos a jusante do sistema, traduzidos numa capacidade limitada da tolva, se salientam como as diferenças mais marcantes – revelou as virtudes do mesmo.

Ambos os modelos – determinístico e estocástico – revelam que um mesmo valor de produção pode ser obtido com configurações de frota distintos, denominando-se *frotas mínimas* aquelas que, de entre o conjunto das que conseguem uma mesma produção, são constituídas por menor número de equipamentos de carga e de transporte.

A legitimação da abordagem determinística é conferida pela constatação da existência de coincidência na colecção de frotas mínimas emanadas pelos dois tipos de modelos.

2.5 Um sistema natural tentando ser racional

Passando ao de leve, mas sem ligeireza, pelas diferentes considerações de muito respeitáveis autores que se ocuparam da tipologia dos sistemas, podemos, no âmbito do presente trabalho, considerar que os modelos de organização de sistemas podem ser divididos em dois grandes grupos: os de características racionais e os que caracterizam sistemas naturais.

Os modelos de características racionais, que são aqueles que representam sis-

temas que são concebidos como meio intencional e racional de obtenção de objectivos pré-configurados, como sejam a produção de algo, parecem configurar o presente estudo. Neste caso, os elementos constituintes são propositadamente seleccionados em face do contributo que podem emprestar à consumação dos propósitos predefinidos; enquanto que as estruturas são idealizadas com vista a atingir a mais elevada eficácia.

Todavia, modelos destas características são altamente renitentes a admitir a existência de incerteza e absolutamente intransigentes quanto à obrigatoriedade de quantificação da mesma, quando a sua indesejada presença se afigura como inevitável. Num modelo com as características das de um sistema de carga e transporte, não é desprezável a incerteza introduzida pela presença dos operadores das máquinas.

Nos modelos de características naturais, a razão da existência do sistema é a sua própria sobrevivência, pelo que os diferentes elementos trabalham para manutenção desse objectivo. O seu comportamento é determinado pela acção do meio, pelo que a sua lógica é, por oposição ao sistema racional, a de sistema aberto.

Num esquema mecanizado em que as máquinas são operadas por pessoas, há uma interdependência dos dois tipos de modelos: um modelo natural abarcado por um mais global, de características racionais. Ou, sob outro ponto de vista, um sistema social interagindo com um sistema tecnológico. Na realidade, na medida em que não se conhece nenhum sistema que seja por um lado totalmente fechado relativamente ao meio que o rodeia, e por outro que funcione absolutamente de acordo com o previsto, o mais correcto talvez seja considerar uma espécie de sistema misto, no qual os recursos são canalizados para a produção, e em que a parte natural obedeça a uma lógica de racionalidade.

Numa perspectiva sistémica de olhar para o sistema como um todo é desaconselhável, numa tentativa de reduzir a incerteza, tentar isolar a componente técnica e tratá-la de forma racional. Corre-se, ainda, o risco de efectuar um corte forçado e de consequências imprevisíveis na rede de relações.

A ideia de racionalidade passa essencialmente pela necessidade de previsão e controlo dos processos, com vista a tomadas de decisão. O objectivo ambicionado é o do pleno conhecimento da totalidade dos factores que influem um determinado comportamento; isto é: das relações causa-efeito. Todavia, a realidade mostra que, mesmo nos sistemas em que se conhece o desempenho de cada constituinte, a incerteza quanto ao conhecimento exacto da relação causa-efeito só pode ser minorada com um estudo centrado na rede intrincada de relações. É aqui que, muitas vezes, o discernimento ultrapassa o cálculo racional.

Capítulo 3

Uma Proposta de Arranque

*“One of the most highly developed skills
in contemporary western civilization
is dissection: the split-up of problems
into their smallest possible components.*

*We are good at it. So good,
we often forget to put the pieces
back together again. ”*

Alvin Toffler

Este capítulo tem a simultânea função de servir de primeiro registo do caminho percorrido, bem como de testemunho de algumas das dificuldades com que nos fomos deparando e que justificaram, a seu tempo, cada alteração de rumo.

Talvez, nele transpareçam as oscilações de estado de espírito, reflexo de algumas alegrias e decepções mas, sobretudo, de múltiplos espantos e entusiasmos.

3.1 Variabilidade vs produção

3.1.1 O algoritmo

O algoritmo AL98 elaborado por Leite [Leite, 1998] simula um *sistema de carga e transporte* numa exploração mineira a céu aberto.

A história descreve-se da seguinte forma: um relevo (7 horas de trabalho) inicia-se, em geral, após uma pega de fogo, encontrando-se uma parte do material desmontado empilhado e outra parte dispersa ao longo da frente de trabalho. Perante este cenário, a primeira tarefa a ser realizada pelas pás-carregadoras, consiste em realizar uma arrumação de parte do material disperso, para que se possa dar início à operação de remoção. Entretanto, os camiões – que se encontram preparados para a operação de carga – formam uma fila de espera e aguardam pela disponibilidade das pás. Quando a primeira pá acaba de arrumar, vai atender – carregar – o primeiro o primeiro camião¹; após o que este último segue o seu caminho em direcção ao local de descarga, enquanto que a pá executa uma *manobra de arrumação*² de material, que antecede sempre qualquer operação de carga.

¹ A manobra de carga consiste em carregar o balde da pá com material desmontado, despejando-o em seguida na caixa de carga do camião. A este procedimento de: arrancar em direcção à pilha de material desmontado, carregar o balde da pá, recuar com o balde carregado, avançar em direcção à unidade transportadora e despejar o material, recuando em seguida para a posição inicial, é dado o nome de *manobra unitária da pá*. Em cada operação de carga, esta manobra é repetida o número de vezes necessário para encher na totalidade o camião.

² A manobra de arrumação é uma tarefa de redução de dispersão, que consiste em utilizar o balde da pá para formar um pequeno montículo de material desmontado, com um volume tal que

No que diz respeito à pá carregadora, duas coisas podem acontecer: ou está já uma unidade transportadora à espera, pelo que após a realização da manobra de arrumação, a pá inicia uma nova operação de carga; ou não está nenhum camião a aguardar e, nesse caso, a pá entra em espera.

Quanto ao camião que se põs em marcha após a operação de carga, ele vai cumprir um determinado trajecto – *viagem de ida* – até chegar ao local de descarga. Quando lá chega, duas coisas podem acontecer: ou existe fila de espera para a descarga, e ele integra essa mesma fila, aguardando pela sua vez; ou, pelo contrário, o acesso à tolva encontra-se desimpedido e este executa uma *manobra de descarga*³, que consiste em voltar a ré para a tolva, recuar em direcção à mesma e despejar o material⁴.

Após a descarga, o camião inicia *viagem de regresso*, em direcção ao local de carga. Lá chegando, ou não encontra fila de espera e posiciona-se para que possa ser carregado por uma pá que se encontre disponível – em espera – ou, pelo contrário, existe fila de espera e ele toma o seu lugar na mesma, aguardando a sua vez de se posicionar para ser carregado, iniciando, desta forma, novo ciclo.

O ficheiro de *input* permite quantificar uma série de variáveis das quais importa, nesta fase, destacar as seguintes: capacidade da tolva, velocidade de descarga do alimentador, configuração e características da frota.

Por *frota*, entende-se o número de pás e de camiões, sendo que o programa permite que cada máquina tenha características próprias. Essas características são, para as pás: capacidade do balde e características intrínsecas à *manobra de arrumação* e *manobra unitária*. No que diz respeito aos camiões, é possível de-

permita carregar a caixa de um camião. A observação *in loco* desta actividade permite-nos concluir que ela é, provavelmente, de todas operações aqui estudadas, aquela que está mais dependente da técnica do manobrador.

³Como é óbvio, em se tratando do início de um relevo, o primeiro camião encontra sempre a tolva livre.

⁴Mesmo não havendo fila de espera na descarga, existe um outro factor que pode impedir a descarga imediata, obrigando o camião a uma espera. Trata-se de encravamentos, mais ou menos frequentes, do britador – que se encontra a jusante da tolva – devidos à presença de blocos de dimensões demasiado elevadas, que impedem o movimento das maxilas.

finir a capacidade da caixa de carga e características intrínsecas às operações de *viagem de ida*, *viagem de regresso* e *manobra de descarga*.

As características intrínsecas a cada uma das cinco operações acima referidas são de âmbito estatístico. Uma delas diz respeito ao *tempo médio* necessário à concretização da tarefa em questão, enquanto que a outra se refere ao valor do *desvio-padrão* do *tempo médio* de cada uma das tarefas.

3.1.2 Variabilidade

Como é sabido, a *média*, por si só, não basta para representar uma série de valores, porquanto não tem a faculdade de destacar o grau de heterogeneidade ou homogeneidade entre esses valores que compõe o conjunto de dados. Isto é: não basta saber o valor em torno do qual os dados se distribuem; é necessário averiguar o quanto se concentram: qual o grau de agregação ou de dispersão. É possível encontrar variáveis que apesar de terem a mesma média, apresentam distintas distribuições de valores, eventualmente apenas comparáveis no que a esta medida de tendência central dizem respeito. A representatividade da média, bem como das restantes *medidas de localização*, apenas pode ser aferida por recurso às *medidas de dispersão*.

Não obstante o que acaba de ser afirmado, com excepção da *amplitude total* (diferença entre o maior e o menor dos valores da colecção de dados) e do *intervalo interquartilico* (diferença entre o terceiro e o primeiro quartis), todas as outras medidas de dispersão recorrem à média.

A *variância*, que é uma medida de variabilidade dos dados em torno da média, pretende dar uma ideia do desvio de cada um dos valores do conjunto de dados relativamente à média. No entanto, para se proceder a uma análise do grau de dispersão de uma amostra é necessário observar todos os desvios. A limitação óbvia prende-se com o facto de não ser possível concluir nada em relação ao somatório de todos os desvios, pois, para qualquer conjunto de dados, o seu valor

é sempre nulo⁵. A alternativa, e é assim que é efectuado o cálculo da variância, consiste em calcular o somatório do quadrado dos desvios⁶.

Este procedimento, que permite obter apenas valores positivos, tem o senão de fornecer uma informação em que a unidade vem elevada ao quadrado, relativamente àquela que corresponde aos valores observados.

No caso em apreço, enquanto que os valores determinados para realização de determinada tarefa – bem como a média dos mesmos – vem expressos em segundos, a variância seria dada em segundos ao quadrado! Para obstar a essa dificuldade seria, no entanto, fácil proceder à determinação da raiz quadrada do valor obtido e, com isto, regressar às mesmas unidades em que foram recolhidas as observações. Essa é, de facto, a operação que leva à determinação do *desvio-padrão*⁷.

Resolvido o problema de exprimir uma medida de dispersão nas mesmas unidades da variável, pode surgir a necessidade de comparação de duas distribuições distintas e eventualmente definidas em unidades de medida também diferentes ou, ainda, o caso em que as médias das duas distribuições sejam diferentes. Essa aparente limitação é sanada por recurso às *medidas de dispersão relativa*.

Para caracterizar a dispersão ou *variabilidade* dos dados relativamente ao seu valor médio (suposto não-nulo): normalização, pode recorrer-se ao *coeficiente de*

⁵Qualquer que seja o conjunto de dados, por definição de \bar{x} :

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \implies \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) = 0 \quad (3.1)$$

⁶Uma expressão para o cálculo da variância poderá ser:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (3.2)$$

⁷O valor do desvio-padrão seria, então, calculado através da seguinte expressão:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (3.3)$$

variação, que consiste na razão entre o desvio-padrão e a média⁸. Para além de fornecer informação útil para compreensão em termos relativos do grau de concentração em torno das médias, a vantagem inerente ao facto de se tratar de uma medida adimensional, prende-se com a possibilidade de comparar distribuições diferentes.

O coeficiente de variação assume valores entre zero e um (ou entre zero e 100%); sendo nulo quando não existe variabilidade entre os dados, o que ocorre quando o numerador é zero; isto é: quando todos os valores da amostra são iguais. Ao caminhar-se no sentido crescente do valor do coeficiente de variação, vai-se transitando de um conjunto mais homogéneo de dados para uma cada vez maior heterogeneidade.

Se, numa qualquer colecção de dados, se fixar a média e se alterar apenas os valores do desvio-padrão, verifica-se sem surpresas que um aumento ou decréscimo no valor desta última medida se reflecte, de forma directamente proporcional, no valor do coeficiente de variação. De outro modo: quanto maior o valor do desvio-padrão, maior a variabilidade dos dados.

3.1.3 Produção

Concentremos, agora, a atenção numa importante variável dependente do sistema em estudo – a *produção*.

Um dos principais *outputs* do algoritmo AL9701 é o valor – em toneladas – de produção obtido em função das condições iniciais impostas.

Uma constatação que parece ficar definida na análise do modelo de Leite [Leite, 1998] é que, após encontrada uma tolva óptima para uma dada frota, está também encontrado o maior valor para a produção. Aquele autor fez, aliás, uma análise do comportamento de uma função a que ele se referiu como *produtivi-*

⁸O coeficiente de variação (de *Pearson*) é calculado da seguinte forma:

$$cv = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (3.4)$$

dade⁹, como sendo o quociente entre *produção* e *tempos totais de espera* – inactividade, tendo verificado que os picos dessa “produtividade” correspondiam à *linha de crista* do mapa da fig. 2.6; o que parece indicar que há uma relação directa entre a produção e os “coeficientes de utilização”. Aliás, ao constatar que conseguia iguais produções e, consequentemente, “produtividades” com diferentes frotas, facilmente se apercebeu que uma maior “produtividade” era conseguida com a frota que tivesse maior “índice de utilização”¹⁰.

Ao longo do trabalho desenvolvido por Leite [Leite, 1998], aquele autor criou, montou e simulou uma considerável colecção de diferentes cenários, de acordo com as interrogações que mais o atormentavam. Embora o âmbito do seu trabalho se tenha prendido com outros aspectos peculiares do comportamento de diferentes intervenientes nos sistemas de carga e transporte, em determinado momento da sua investigação interrogou-se a propósito do reflexo da variabilidade dos dados no valor da produção. O que não ficava suficientemente esclarecido no seu trabalho era se existiria alguma influência entre a variabilidade das actividades e os valores da produção e produtividade obtidos; isto é: se uma maior ou menor dispersão na colecção de tempos de execução de cada actividade implicaria extremos (máximos ou mínimos) de produção e produtividade.

Procurou, então, resposta para uma questão que se lhe terá afigurado mais ou menos da seguinte forma: *Será que um maior grau de determinismo – medido pelo inverso do coeficiente de variação – no desempenho das tarefas implica um maior rendimento (leia-se valor de produção)?*

Nas suas próprias palavras: “*O objectivo que nos orientou foi verificar a coerência (ou não) dos resultados com a proximidade ou afastamento da duração das*

⁹A legitimidade da utilização deste termo – *produtividade* – será analisada mais adiante, neste mesmo documento.

¹⁰Por índice de utilização, entende-se o tempo efectivo de utilização dos equipamentos. Se duas frotas, com número distinto de equipamentos geram uma mesma “produtividade” (razão entre *produção* e *somatório do tempo total de paragem*), é porque na frota de menor dimensão existe menor *somatório do tempo total de paragem*, visto que o valor da produção tende para ser mais elevado quanto maior a dimensão da frota.

actividades em relação a uma situação limite correspondente à existência de um mínimo para os valores da dispersão dos tempos de execução dessas actividades”.

Na realidade, Leite [Leite, 1998] testou, para uma dada frota, uma situação em que fixava as médias, fazendo variar o desvio-padrão.

No cenário por ele idealizado partia-se do princípio de que uma mesma actividade era, em média, realizada no mesmo tempo, apenas variando a colecção de tempos e, conseqüentemente, o desvio-padrão. Partindo dos valores de referência do coeficiente de variação e centrando-se apenas na frota 2p6c¹¹, procedeu às simulações que lhe trouxeram resultados que, de uma forma genérica, mostravam um claro aumento da produção, acompanhado de uma diminuição substancial dos *tempos totais de espera*¹², à medida que ia impondo coeficientes de variação mais baixos.

Pese embora a sua não tenha sido uma busca exhaustiva, e salvaguardando esse facto, em face dos resultados obtidos concluiu que uma aproximação ao determinismo faz diminuir os tempos perdidos, aumentando, desta forma, o rendimento de cada unidade (quer de carga quer de transporte), o que se traduz num aumento de produção e, conseqüentemente, naquilo que definiu como *produtividade*: quociente entre produção e somatório dos tempos de inactividade das diferentes máquinas.

Numa análise superficial, poderia parecer óbvio que uma menor variabilidade das actividades (situação mais determinística) implicaria uma maior regularidade, isto é uma maior produção e, conseqüentemente, uma maior “produtividade”. Se isto fosse verdade, não deveria ser difícil comprová-lo.

O exercício que nos propusemos foi o de, olhando frota a frota, estudar um pouco mais detalhadamente o comportamento do sistema em face de alterações

¹¹Duas pás (unidade carregadora) e seis camiões (unidade transportadora). Notação que passa a ser utilizada para descrever a constituição das frota.

¹²Por tempos totais de espera entende-se como sendo o somatório dos tempos de inactividade de todas as máquinas de carga e de transporte; isto é: TECP (tempo de espera dos camiões na zona de carga), TEP (tempo de espera das pás), TECD (tempo de espera dos camiões na zona de descarga).

na variabilidade.

Portanto, é exactamente neste ponto que agora se retoma o trabalho. Procuramos, então, justificar essa opção: como acaba de ser dito, a análise dos dados obtidos por Leite [Leite, 1998], revela que para os casos considerados, a produção aumenta sempre que se caminha no sentido de um maior determinismo. Todavia, num dos gráficos por si produzidos (fig. 3.1¹³) existe um patamar, que corresponde a uma passagem de um cenário para outro de características mais determinísticas sem que haja aumento de produção. O aparecimento daquela aparente anomalia gráfica deixava em aberto a seguinte questão: “*será que existe de facto uma relação inequívoca entre a produção e a variabilidade das actividades?*”. Este aparente detalhe aliado ao facto de já Miranda [Miranda, 1986]¹⁴, no algoritmo por si desenvolvido aquando dos seus trabalhos de doutoramento¹⁵ ter detectado casos em que uma aproximação ao determinismo nem sempre era sinónimo de aumento de produção, aguçou a nossa curiosidade.

3.2 Coeficiente de variação

3.2.1 Procedimentos

Como parâmetro de análise da variabilidade optamos pelo já referido *coeficiente de variação*: *cv*. Decidiu-se fixar as médias, fazendo variar os desvios-padrão, desde um valor determinístico até à situação mais desordenada.

A fórmula utilizada para a determinação do *cv*, foi a seguinte:

$$cv = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (3.5)$$

¹³Corresponde à fig. XI - 40 do seguinte documento: Leite, A.J.M., 1998, “Transformação de Um Objecto da Indústria Extractiva em Sistema. Alguma consequências”, Departamento de Minas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – Porto – Portugal.

¹⁴Miranda, H.S.B., 1986, “Transportes Mineiros. Efeitos Peculiares da Disciplina de Fecho do Relevô”, Departamento de Minas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto – Portugal.

¹⁵Algoritmo que passará a ser referido como HM86.



Figura 3.1: Gráfico representativo da evolução dos valores da produção em função de um aumento no valor do coeficiente de variação.

Os inputs objecto do nosso estudo foram os valores dos desvios-padrão dos tempos de actividade das cinco operações consideradas no ficheiro de *input* do algoritmo AL9701, a saber:

- Actividades relacionadas com a pá:
 - arrumação;
 - manobra unitária.
- Actividades relacionadas com o camião:
 - viagem de ida;
 - viagem de volta;
 - descarga.

Os valores de *cv* utilizados para cada uma das cinco actividades pelo algoritmo AL9701 serviram como valores de referência, a partir dos quais se fez variar o *cv* em ambos os sentidos. Numa primeira fase determinou-se uma colecção de

valores necessários para fazer variar o cv com passos de 10% relativamente aos valores de referência¹⁶.

O estudo recaiu inicialmente sobre as 4 frotas correspondentes a uma maximização da função “produtividade” anteriormente definida:

frota 1: uma pá e três camiões ($1p3c$);

frota 2: duas pás e cinco camiões ($2p5c$);

frota 3: duas pás e seis camiões ($2p6c$);

frota 4: três pás e nove camiões ($3p9c$).

A *função objectivo* (fo) que se pretendeu estudar foi a definida pelo quociente entre a *produção* (P) e o *somatório da totalidade dos tempos de espera* (p). Não obstante ter sido anteriormente referido, importa relembrar que como tempos de espera se entende como sendo os tempos de paragem dos camiões nas filas de carga e de descarga, bem como as esperas das pás, por falta de unidades transportadoras para carregar.

A função objectivo ficou, então, assim definida:

$$fo = \frac{P}{p} \quad (3.6)$$

Os motivos que presidiram à escolha desta fo prenderam-se, por um lado, com um aproveitamento de *outputs* fornecidos pelo algoritmo AL9701, e por outro, com o facto de esta ter sido uma função aprofundadamente estudada por Leite [Leite, 1998], pelo que, num trabalho de continuidade como o presente, são de privilegiar as situações que facultem a possibilidade de confrontação de resultados.

¹⁶Os valores de referência são aqueles que Leite [Leite, 1998] considerou no seu modelo, e que foram resultantes das curvas de ajuste *pr si efectuadas*, a partir das colecções de valores correspondentes a cada uma das 5 actividades, recolhidos em situações reais de laboração de explorações mineiras a céu aberto.

Os valores obtidos permitiram analisar a evolução quer da produção, quer da função objectivo (que em Leite [Leite, 1998] é apresentada como uma produtividade), em função da variação do cv (esta última variação, ela própria consequência unicamente da variação dos valores do desvio-padrão: σ). Com base nesses dados foram construídos gráficos representativos dessas mesmas evoluções, que são apresentados nas figuras 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5.

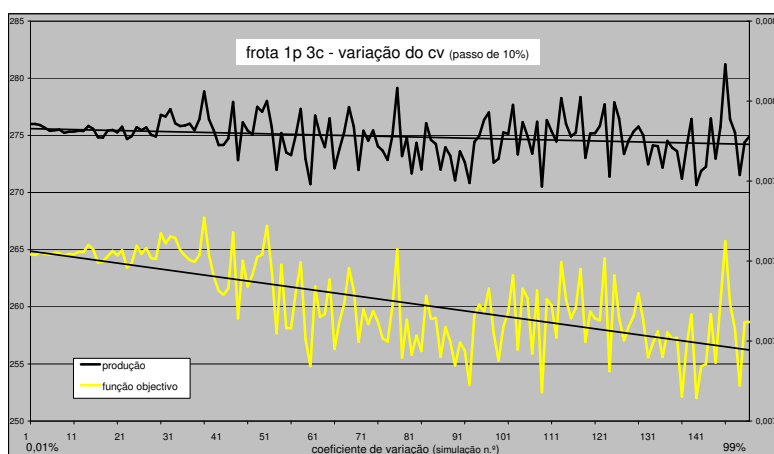


Figura 3.2: Gráfico representativo de evolução de P e fo , em função de variação do valor de cv (de 0 a 100%, com passos de 10%) – frota 1p3c.

O processo de simulação de cada frota corresponde a 150 diferentes corridas. O valor de cada variável obtido no final de uma corrida corresponde à média aritmética do número de repetições – relevos¹⁷ – efectuados. No presente caso, e nesta fase, cada corrida compreendeu 1000 relevos, o que corresponde a outros tantos dias de laboração da exploração mineira: cerca de quatro anos.

A observação dos gráficos obtidos permite concluir que à medida que se vai aumentando o valor de σ e, consequentemente, de cv ; ou, de outra forma, se

¹⁷Por relevo entende-se como sendo um dia inteiro de laboração da mina.

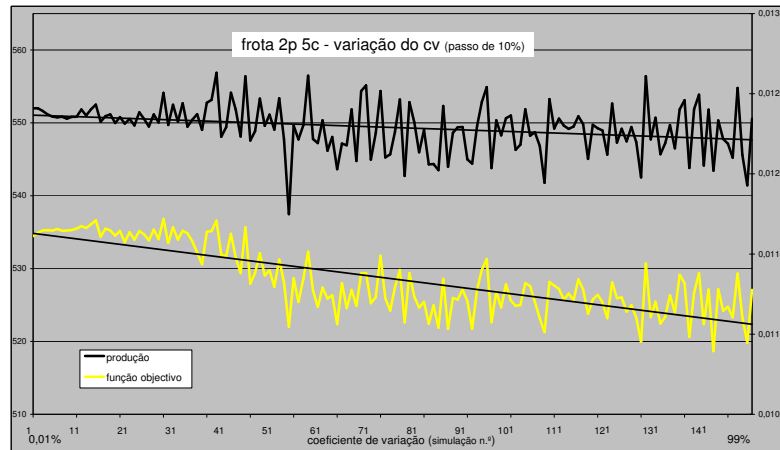


Figura 3.3: Gráfico representativo de evolução de P e fo , em função de variação do valor de cv (de 0 a 100%, com passos de 10%) – frota 2p5c.

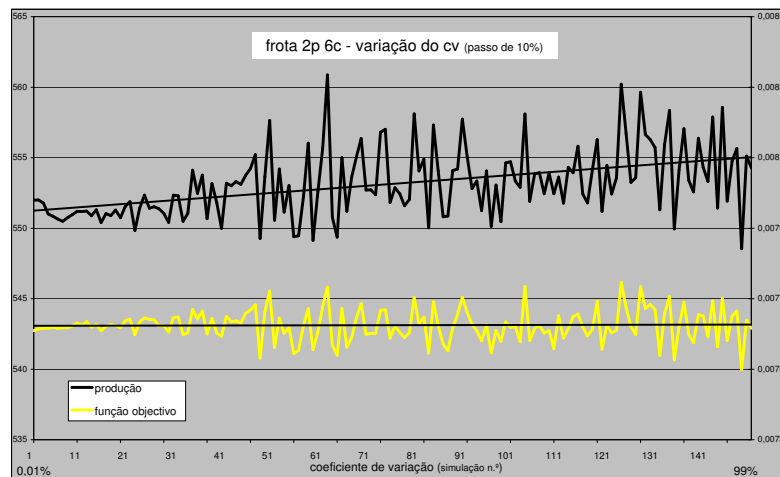


Figura 3.4: Gráfico representativo de evolução de P e fo , em função de variação do valor de cv (de 0 a 100%, com passos de 10%) – frota 2p6c.

dá uma transição gradual duma situação próxima do determinismo para uma de características mais desordenadas, quer a produção quer a função objectivo vão sofrendo um decréscimo. No entanto, essa evolução está longe de ser regular, apresentando situações em que para dois valores sucessivos de cv , P e fo sofrem, ao contrário da tendência geral, um acréscimo. Tomando como exemplo o gráfico da fig. 3.3 e em relação à produção, essa situação acontece em 17% dos casos, o que não deixa de ser significativo.

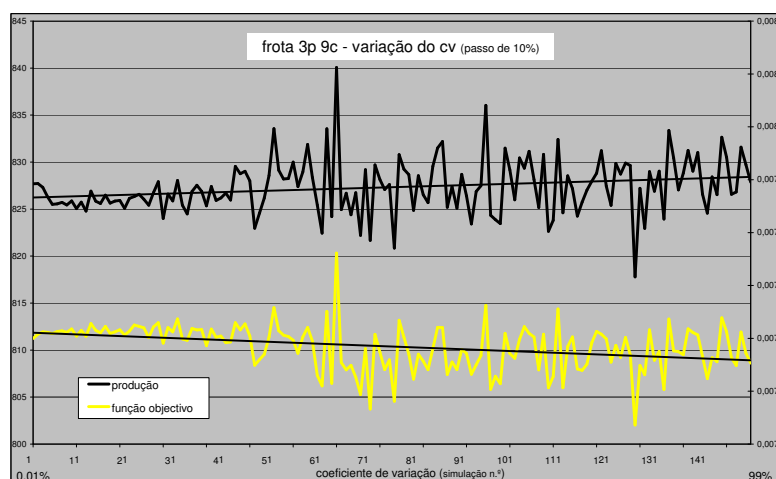


Figura 3.5: Gráfico representativo de evolução de P e fo , em função de variação do valor de cv (de 0 a 100%, com passos de 10%) – frota 3p9c.

Os valores de referência do desvio-padrão relativos ao tempo de realização de cada uma das cinco actividades¹⁸ – considerados no algoritmo AL9701 e reutilizados na presente simulação – são todos distintos; o que implica que ao fazer-se evoluir todos eles com passos equivalentes, os respectivos cv vão atingindo o limite máximo do seu intervalo de variação em instantes diferentes. Como con-

¹⁸Manobra de arrumação da pá, manobra unitária da pá, manobra de descarga do camião, viagem de ida do camião e viagem de regresso do camião.

sequência, resulta que quando aquela actividade à qual é imputada um σ mais elevado atinge o limite máximo imposto – correspondente a $cv = 0,99$ – o processo de simulação não pára; o que acontece é que, para essa actividade, o valor de σ é fixado; sendo que nas simulações subsequentes apenas se faz variar os valores dos desvios-padrão das restantes actividades. À medida que o coeficiente de variação de cada uma das actividades vai atingido o seu máximo, o respectivo valor de σ vai sendo fixado. O processo de simulação apenas termina quando em todas as cinco operações é atingido o desvio-padrão correspondente ao coeficiente de variação máximo ($cv = 0,99$).

No cenário que acaba de ser descrito – que deu origem aos gráficos das figuras 3.2 a 3.5 – as condições que presidem ao início das simulações não se mantêm inalteradas até final; isto é: numa fase inicial os coeficientes de variação das cinco operações vão sendo modificados mas, a partir de determinada altura, eles vão sendo gradualmente fixados. Neste contexto, optamos por uma nova abordagem, que privilegiasse uma observação mais detalhada da franja de simulações em que todos os coeficientes de variação sofrem alteração.

Essas condições estão presentes no intervalo que configura como limite inferior uma situação próxima do determinismo e como limite superior a situação em que o cv da primeira das cinco tarefas atinge o seu valor máximo ($cv = 0,99$)¹⁹. Significa, em termos mais práticos, que optamos por olhar, de forma mais detalhada, para as primeiras 34 simulações de cada um dos gráficos das figuras 3.2 a 3.5.

Esta economia de tempo (34 simulações em vez de 150) permitiu-nos decidir pelo aperto do passo de simulação, passando dos anteriores 10% para 5%. A intenção foi, também, a de averiguar se existiria algum padrão evolutivo presente, independentemente da escala considerada.

Com base nos resultados obtidos foram construídos os gráficos representados nas figuras 3.6, 3.7, 3.8 e 3.9.

¹⁹A tarefa cujo cv primeiro atinge o limite máximo é a *viagem de volta* do camião

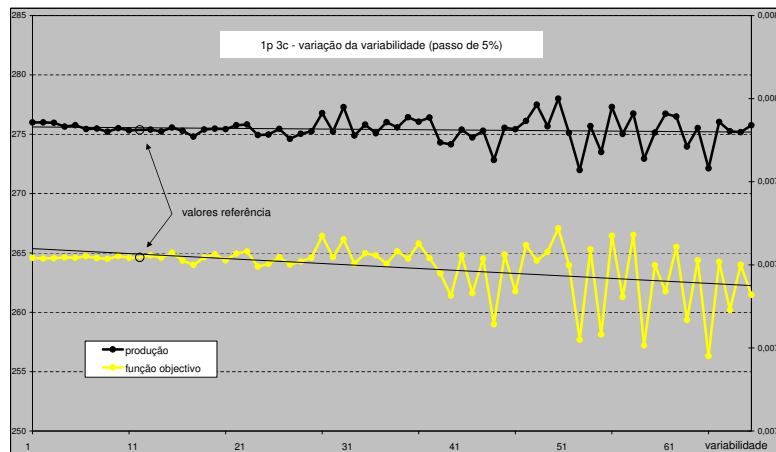


Figura 3.6: Exemplo de um gráfico representativo de evolução de P e fo , em função de variação do valor de cv (com passos de 5%) – frota 1p3c.

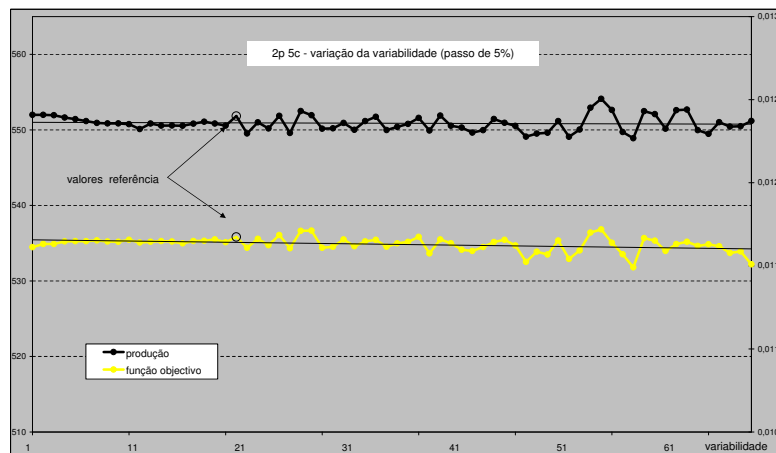


Figura 3.7: Exemplo de um gráfico representativo de evolução de P e fo , em função de variação do valor de cv (com passos de 5%) – frota 2p5c.

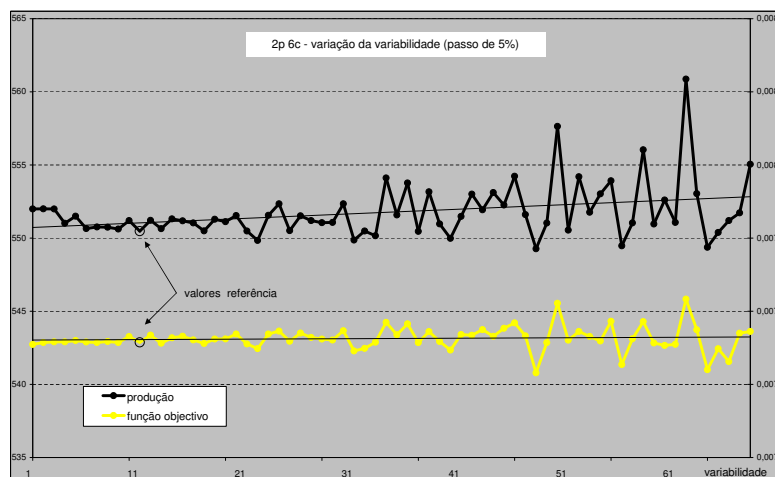


Figura 3.8: Exemplo de um gráfico representativo de evolução de P e fo , em função de variação do valor de cv (com passos de 5%) – frota 2p6c.

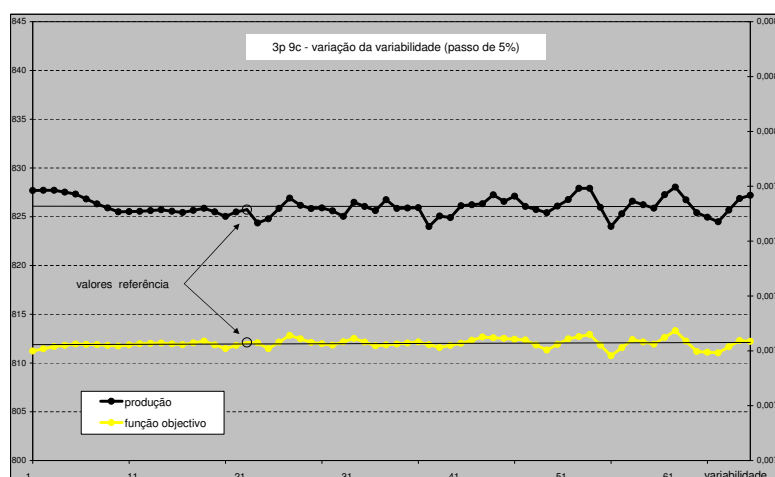


Figura 3.9: Exemplo de um gráfico representativo de evolução de P e fo , em função de variação do valor de cv (com passos de 5%) – frota 3p9c.

3.2.2 Algumas conclusões

As conclusões que agora se resumem resultam de uma análise cuidada dos resultados obtidos, apoiada pelo estudo atento dos gráficos elaborados, e referem-se às quatro configurações de frota acima definidas.

Primeiros gráficos (figs. 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5)

Em face da observação dos primeiros gráficos (aqueles em que se fez variar o cv com passos de 10% relativamente aos valores de referência, tendo como mínimo uma situação próxima do determinismo – $cv = 0,0001$ – e como máximo um cenário desordenado: $cv = 0,99$) parece pertinente dividir a sua análise em 3 zonas, a saber:

zona A : Entre a origem e o valor referência dos desvios-padrão.

Zona de maior determinismo (simulações 1 a 11)

zona B : Entre o limite superior da zona A e o local onde a primeira das operações atinge um valor de cv máximo. Zona de transição (simulações 12 a 35)

zona C : Restante traçado. Zona de maior desordem²⁰ (simulações 36 a 150)

Regularidade: Em qualquer das 4 frotas, existe uma evolução mais regular na zona A, menos regular na zona B e muito irregular na zona C.

Produção vs função objectivo: Na zona A, em qualquer das 4 frotas, verifica-se um decréscimo da produção, acompanhado dum respectivo acréscimo da função objectivo, o que provavelmente significa que o decréscimo do somatório dos tempos de espera (p) é mais significativo do que o decréscimo da produção (P).

²⁰ A esta desordem referir-nos-emos por vezes como *caótica*, mas que, pelo menos nesta fase do trabalho, apenas significa “a caminhar num sentido oposto ao do determinismo”.

Tendência geral: Nas frotas $1p3c$ e $2p5c$, a tendência geral, quer da produção quer da função objectivo, é de decréscimo à medida que se caminha na direcção das situações mais caóticas.

Nas frotas $2p6c$ e $3p9c$, a função objectivo mantém-se estável (com ligeira tendência para a descida na frota $3p9c$), ao passo que a produção tem tendência para crescer.

Segundos gráficos (figs. 3.6, 3.7, 3.8 e 3.9.)

As constatações anteriores – referentes aos primeiros gráficos – mantém-se, pelo que esta análise mais pormenorizada não se traduziu em nenhuma outra mais-valia que não aquela de sugerir que o comportamento das variáveis é independente da escala de observação.

Congruências

- Existe uma maior regularidade no *troço determinístico*²¹;
- Existe menor regularidade no *troço caótico*²².

Incongruências

- Os picos de maiores produção e função objectivo situam-se em *zona caótica*. Uma possível explicação poderá estar na constatação de que as diferenças de produção relativamente às conseguidas com uma situação de características mais determinísticas não excedem, regra geral, a tonelagem de um camião, pelo que o que provavelmente acontece é que uma diferença de poucos segundos poderá permitir o cumprimento de mais uma viagem, i.e., mais um camião a descarregar na tolva²³;

²¹Referimo-nos ao tramo correspondente ao que anteriormente foi definido como “Zona A”.

²²Referimo-nos ao tramo que tem início no limite superior da “Zona A” e que se estende para a direita.

²³Isto porque, ao fixarmos a média do tempo de realização de cada tarefa, fazendo variar o desvio-padrão, o modelo vai simular que, em diferentes momentos de laboração, uma mesma actividade possa ter tempos de execução bastante distintos.

- O aumento de produção e função objectivo na frota $2p6c$ à medida que se caminha em direcção às situações mais caóticas configura uma situação não esperada, pelo que carece igualmente de uma explicação; motivo pelo qual importa assinalar este instante como um dos que constituíram uma contribuição decisiva para a definição do rumo que este trabalho tomou

3.2.3 Uma função objectivo

Na abordagem anterior, os valores de cv foram sendo alterados, partindo dos valores de referência – que são diferentes para cada uma das cinco operações contempladas pelo algoritmo – o que conduziu a dois diferentes cenários. Numa primeira fase pretendeu-se que os valores de cv das diferentes operações fossem atingindo gradual e individualmente o limite superior ($0 < cv < 1$) e aí fossem sendo fixados, prolongando-se, no entanto, a simulação até que a última das cinco tarefas atingisse esse limite; o que representa o sistema a funcionar parcialmente em regime caótico e parcialmente num outro regime. Posteriormente montou-se um cenário – “segundos gráficos” – em que se terminava a simulação no imediato instante em que a primeira das tarefas atingisse, por meio do valor do seu cv , o limite superior do intervalo de variação.

Quer num caso quer no outro, ficava por simular o sistema a evoluir de forma mais harmónica, ou seja, com as operações a serem realizadas em regime semelhante. Deste modo, a abordagem seguinte passou por considerar esse cenário em que as diferentes operações passassem a ter igual valor de desvio-padrão e, consequentemente, igual coeficiente de variação em cada simulação. O objectivo passava por não induzir, à partida, pendor diferente a cada uma das diferentes tarefas.

Nesta fase optou-se por concentrar o estudo numa zona mais restrita: compreendida entre o determinismo (cv muito próximo de zero) e um valor de coeficiente de variação de 25%, e por “refinar” a busca, apertando, para esse efeito, o passo para 2,5%. O primeiro objectivo prendeu-se essencialmente com a im-

possibilidade efectiva de estudar todo o espectro, mas também com o facto de a irregularidade anteriormente verificada no traçado das variáveis representadas graficamente não apontar, pelo menos numa primeira análise, para a existência de uma regra evolutiva clara passível de ser estudada. Quanto à passagem progressiva para passos de amostragem mais apertados, ficou a dever-se à vontade de estudar mais pormenorizadamente, bem como à necessidade de comparar comportamentos a diferentes escalas.

Continuaram a ser testadas as mesmas quatro configurações de frota.

Em face dos resultados obtidos, e na sequência do que tinha sido feito nas simulações anteriores, foram construídos gráficos representativos da evolução quer da produção quer da função objectivo, os quais são apresentados nas figuras 3.10, 3.11 e 3.12. A estes acrescentamos, agora, gráficos representativos da evolução do *somatório da totalidade dos tempos de espera*: p , apresentados nas figuras 3.13, 3.14, 3.15 e 3.16.

Foi necessário recorrer a dois gráficos para representar a variável produção, na medida em que a disparidade de valores obtidos para as diferentes frotas impediria uma leitura satisfatória no caso da informação estar condensada num único gráfico. Assim, o gráfico da figura 3.10 corresponde às frotas $2p5c$ e $2p6c$, visto que os valores de P para estas duas configurações variam entre gamas próximas. Quanto às frotas $1p3c$ e $3p9c$, apesar das gamas de variação de P serem absolutamente distintas, optamos por representá-las num mesmo gráfico – 3.11, correspondendo o eixo principal das ordenadas (o eixo mais à esquerda) à frota $1p3c$ e o eixo secundário das ordenadas (o eixo mais à direita) à frota $3p9c$.

Não obstante terem sido utilizados dois gráficos para a representação da produção, para tornar possível uma análise comparativa da evolução desta variável nas quatro configurações simuladas, definiu-se para todas elas idêntico intervalo de variação de P .

No gráfico da fig. 3.12, o primeiro eixo das ordenadas corresponde às frotas $1p3c$, $2p6c$ e $3p9c$, enquanto que o segundo eixo corresponde à frota $2p5c$.

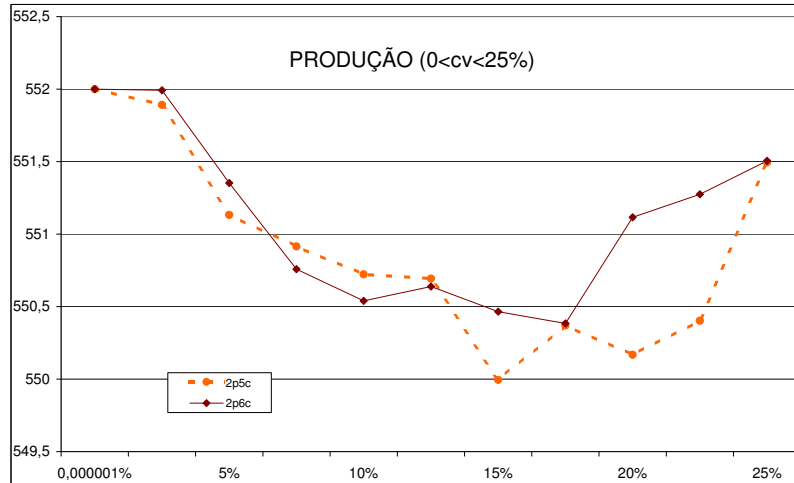


Figura 3.10: Gráficos representativos da evolução de P , nas frotas $2p5c$ e $2p6c$, em função de variação do valor de cv (com passos de 2,5%).

Devido à grande disparidade de valores de p , não foi possível apresentar as quatro curvas num mesmo gráfico. Optou-se por fazê-lo em separado, mantendo, no entanto, idêntico intervalo de variação de tempos (10 min), por forma a facilitar a leitura comparativa (figs. 3.13, 3.14, 3.15 e 3.16).

Da observação dos três tipos de gráficos (P , fo e p), é possível constatar que, à medida que se caminha no sentido oposto ao do determinismo:

- os gráficos relativos à evolução da produção se apresentam bastante irregulares embora com tendência geral de descida, o que, numa primeira análise parece fazer sentido;
- os gráficos da função objectivo apresentam-se bastante irregulares embora com tendência geral de subida, o que, por seu lado, contraria as expectativas;
- os gráficos dos tempos de paragem apresentam tendência de descida, o que numa primeira análise pode parecer surpreendente, porquanto haja propen-

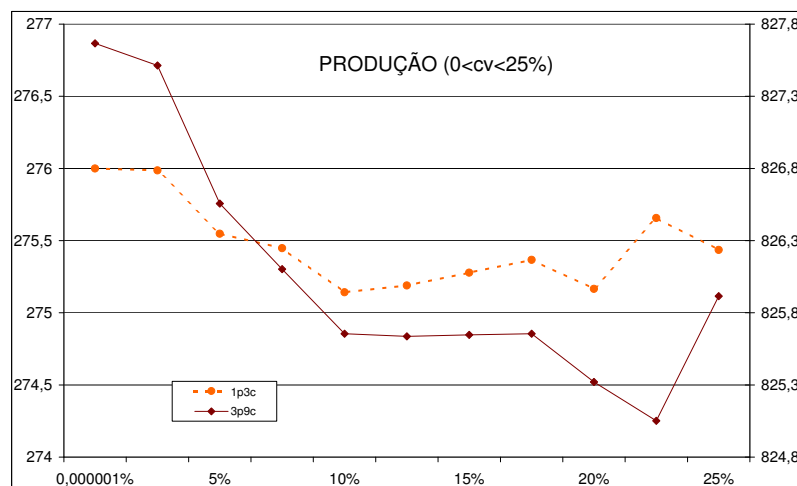


Figura 3.11: Gráficos representativos da evolução de P , nas frotas $1p3c$ e $3p9c$, em função de variação do valor de cv (com passos de 2,5%).

são para esperar que num sistema a funcionar próximo do determinismo o aproveitamento dos recursos seja mais racional e, por conseguinte, menos sujeito a desperdício (no caso presente: de tempo)²⁴.

Uma vez que P – numerador – e p – denominador – concorrem simultaneamente, e de forma oposta, para a fo , importa fazer uma análise conjunta destas duas componentes. Nesse sentido, o passo seguinte consistiu em ordenar os dados por ordem crescente de P e, em seguida, construir gráficos de P vs p .

Em qualquer das quatro frotas estudadas verificou-se que a um aumento de produção tanto pode corresponder um aumento como uma diminuição do valor do somatório dos tempos de inactividade. Nesse sentido, optou-se por acrescentar uma informação, a saber: o valor de cv para cada par (P, p) . A título de exemplo, apresenta-se o gráfico da fig. 3.17, como representativo da situação referida.

²⁴ Assinalemos mais este instante de detecção de resultados inesperados.

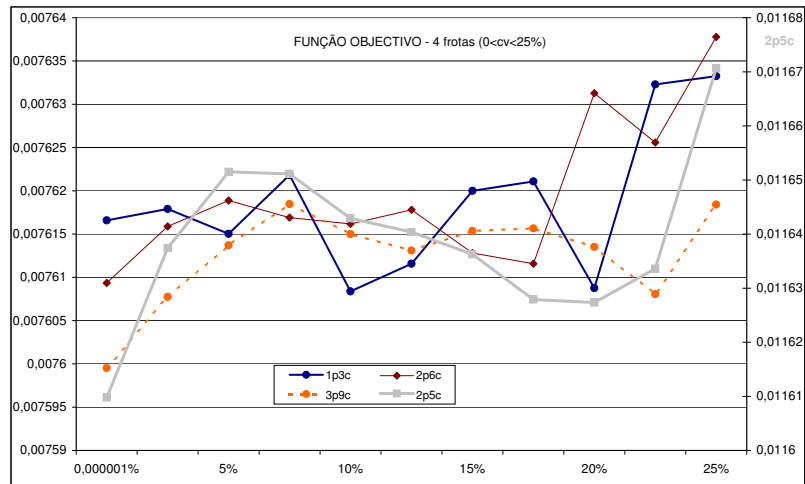


Figura 3.12: Gráfico representativo da evolução de f_o , em 4 diferentes frotas (1p3c, 2p6c, 3p9c e 2p5c), em função de variação do valor de cv (com passos de 2,5%).

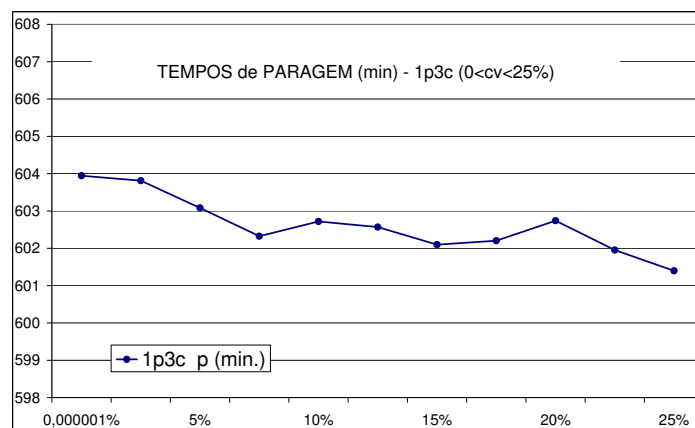


Figura 3.13: Gráfico representativo da evolução de p , na frota 1p3c, em função de variação do valor de cv (com passos de 2,5%).

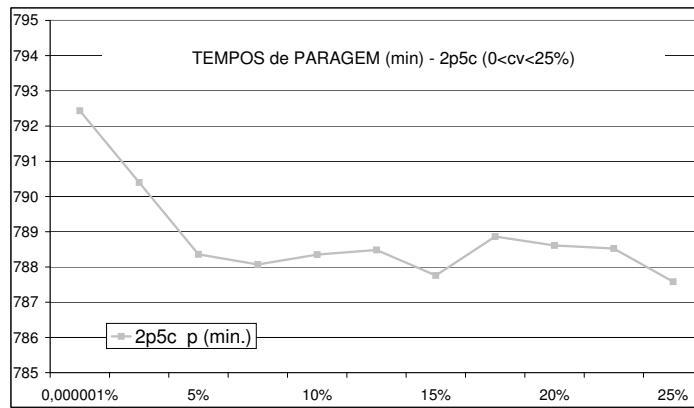


Figura 3.14: Gráfico representativo da evolução de p , na frota 2p5c, em função de variação do valor de cv (com passos de 2,5%).

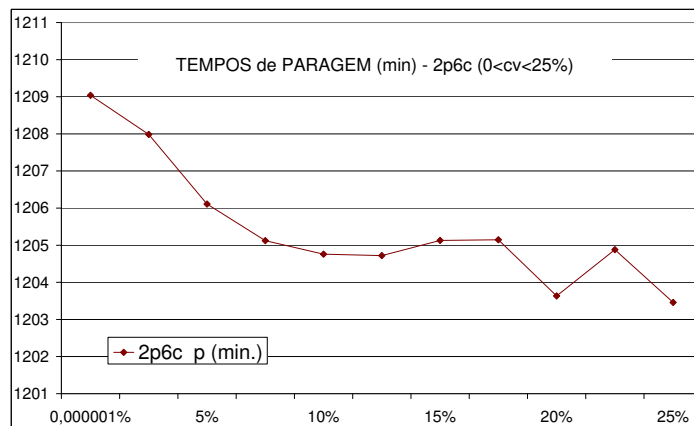


Figura 3.15: Gráfico representativo da evolução de p , na frota 2p6c, em função de variação do valor de cv (com passos de 2,5%).

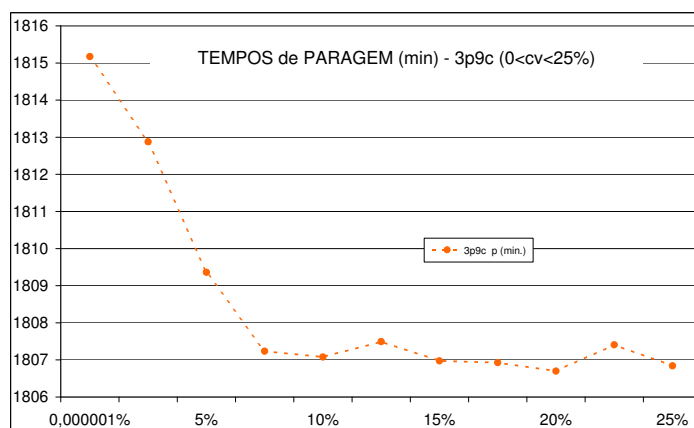


Figura 3.16: Gráfico representativo da evolução de p , na frota 3p9c, em função de variação do valor de cv (com passos de 2,5%).

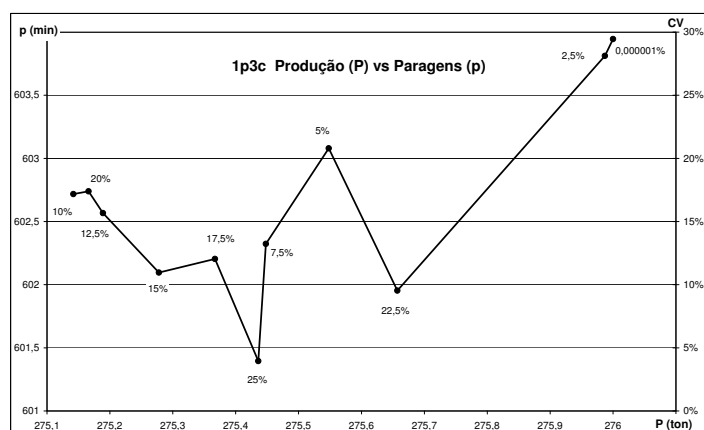


Figura 3.17: Exemplo de gráfico demonstrativo do comportamento do somatório dos tempos de paragem em função da variação do valor da produção, incluindo respectivos valores de cv .

Ao acrescentar esta informação, mais uma vez se conseguiu verificar que existiam inúmeros casos em que a um acréscimo do valor de cv correspondia um acréscimo da produção. Por vezes esse aumento da produção era acompanhado por uma diminuição do somatório dos tempos de espera, mas nem sempre isso acontecia.

Começava aqui a tornar-se mais ou menos clara a necessidade de aprofundar o estudo das várias combinações de comportamento conjunto de P e p , em função da variação do valor de cv .

3.2.4 Tempos de inactividade

O estudo dos dados até ao momento obtidos apontava, de forma inequívoca, para a existência de casos em que com um valor de cv próximo do determinismo se contabilizavam maiores tempos de paragem dos equipamentos do que com outro valor de cv mais elevado. Comparados todos os pares de valores obtidos, chegou-se à conclusão de que, em qualquer das quatro configurações de frota consideradas nas simulações, essa diferença nos *tempos totais de espera* tinha maior expressão na passagem de um valor de $cv = 0,000001\%$ para um valor de $cv = 7,5\%$.

A possibilidade de esse facto apontar para a existência de algum tipo de padrão comportamental, impeliu-nos a averiguar o comportamento de outras configurações de frota até então não simuladas. No caso de uma resposta afirmativa seria fundamental saber se a dimensão do “degrau”²⁵ seria semelhante para todas as frotas, ou se, por outro lado, existiria alguma regra para a sua definição.

Para tentar clarificar estas questões, optou-se por uma simulação extremamente morosa e exaustiva de 144 frotas (combinações de até 12 pás e 12 camiões). Para cada uma das frotas simulou-se o valor de p para valores de $cv = 0,000001\%$ e para valores de $cv = 7,5\%$. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 3.1.

Com os valores do terceiro quadro da tabela 3.1 construiu-se um mapa de

²⁵Por degrau entenda-se a diferença entre os *tempos totais de espera* nos dois cenários — $cv = 0,0000001$ e $cv = 0,075$ — acima salientados.

	1 pá	2 pás	3 pás	4 pás	5 pás	6 pás	7 pás	8 pás	9 pás	10 pás	11 pás	12 pás
12 cam.	262741	223549	184392	153763	174485	200189	226251	247332	267589	300940	328723	347423
11 cam.	237574	198382	159223	129917	152531	173370	198799	229260	247506	272270	307164	319158
10 cam.	212407	173214	134053	106263	125776	151799	173056	202912	225740	253698	277215	296713
9 cam.	187239	148046	108910	81412	101497	130189	150889	178905	202431	227765	252282	275660
8 cam.	162072	122878	83897	58469	79911	103787	129785	154579	178024	202485	231092	253563
7 cam.	136905	97710	59061	36766	56463	80629	104073	133174	155644	180058	205556	231016
6 cam.	111738	72542	34258	17227	42728	68174	93174	117782	142671	167225	192673	217387
5 cam.	86571	47546	10862	24165	49434	74310	99291	124330	149451	173958	199278	224231
4 cam.	61404	22557	14008	38488	63316	87659	113416	138306	163410	188155	213897	237999
3 cam.	36237	4387	28923	53744	78331	104048	126685	151142	178395	203095	227307	251842
2 cam.	11244	19029	44120	68534	94240	119269	143826	168307	194404	218633	243882	268944
1 cam.	9478	34420	59352	84392	109298	134214	159309	184226	209136	234122	258981	284141

	1 pá	2 pás	3 pás	4 pás	5 pás	6 pás	7 pás	8 pás	9 pás	10 pás	11 pás	12 pás
12 cam.	262501	223291	183927	151708	171117	197278	223983	250399	270668	294404	329454	349333
11 cam.	237350	198127	158736	129789	148809	172730	199460	224112	249506	270376	299168	323040
10 cam.	212200	172963	133560	105422	127177	150625	176327	204485	229483	251203	277370	299226
9 cam.	187049	147799	108434	81896	102595	123082	154754	177670	202306	226398	252105	279206
8 cam.	161898	122635	83396	59658	79830	102165	126570	155570	178197	204006	231056	252505
7 cam.	136748	97471	58433	35419	56260	82516	103395	129833	156095	180040	204573	228740
6 cam.	111597	72307	34123	20081	44206	68323	92334	118419	144720	168279	194017	219114
5 cam.	86446	47284	13277	25278	49645	75195	100210	125439	149954	175009	200282	224947
4 cam.	61295	22542	14814	38815	63810	88770	113770	138766	163819	188370	213788	238754
3 cam.	36139	6160	28639	53625	78545	103515	128743	153607	178802	203655	228569	253673
2 cam.	11280	18880	43776	68697	93825	118722	143714	168818	193853	218637	243739	268641
1 cam.	9239	34212	59181	84209	109121	134125	159130	184069	209077	234015	259127	284063

	1 pá	2 pás	3 pás	4 pás	5 pás	6 pás	7 pás	8 pás	9 pás	10 pás	11 pás	12 pás
12 cam.	240	259	466	2055	3368	2911	2268	-3067	-3079	6537	-731	-1910
11 cam.	223	255	487	127	3721	640	-661	5148	-2000	1894	7996	-3882
10 cam.	207	251	493	840	-1401	1174	-3271	-1573	-3743	2495	-155	-2513
9 cam.	190	247	476	-484	-1098	7107	-3865	1235	126	1368	177	-3547
8 cam.	174	243	501	-1189	81	1622	3215	-991	-173	-1521	36	1058
7 cam.	158	239	628	1347	203	-1887	678	3341	-450	18	983	2275
6 cam.	141	235	135	-2854	-1478	-149	840	-636	-2049	-1054	-1344	-1727
5 cam.	125	262	-2415	-1112	-211	-886	-919	-1109	-503	-1051	-1004	-715
4 cam.	108	15	-806	-328	-494	-1112	-354	-461	-409	-215	109	-755
3 cam.	97	-1773	284	119	-213	533	-2058	-2465	-407	-560	-1262	-1832
2 cam.	-36	149	343	-163	416	548	113	-511	551	-4	142	303
1 cam.	238	208	170	183	177	89	179	156	59	108	-146	78

Tabela 3.1: Somatório dos tempos de paragem relativos a 144 frotas. O primeiro quadro diz respeito a um cenário relativo a $cv = 0,00000001$, o segundo diz respeito a um cenário de $cv = 0,075$, enquanto o terceiro representa a diferença entre os dois anteriores ($p_{cv=0,00000001} - p_{cv=0,075}$).

isolinhas (fig. 3.18), com o objectivo de fornecer uma imagem do comportamento do eventual degrau de diferenças de *tempos totais de espera* para as duas situações de valor de *cv* simuladas. Contudo, quer a análise dos dados quer o estudo do mapa de isolinhas, não nos permitiram tirar qualquer conclusão satisfatória quanto à hipótese, anteriormente formulada, de existência de degrau de diferenças de *p*.

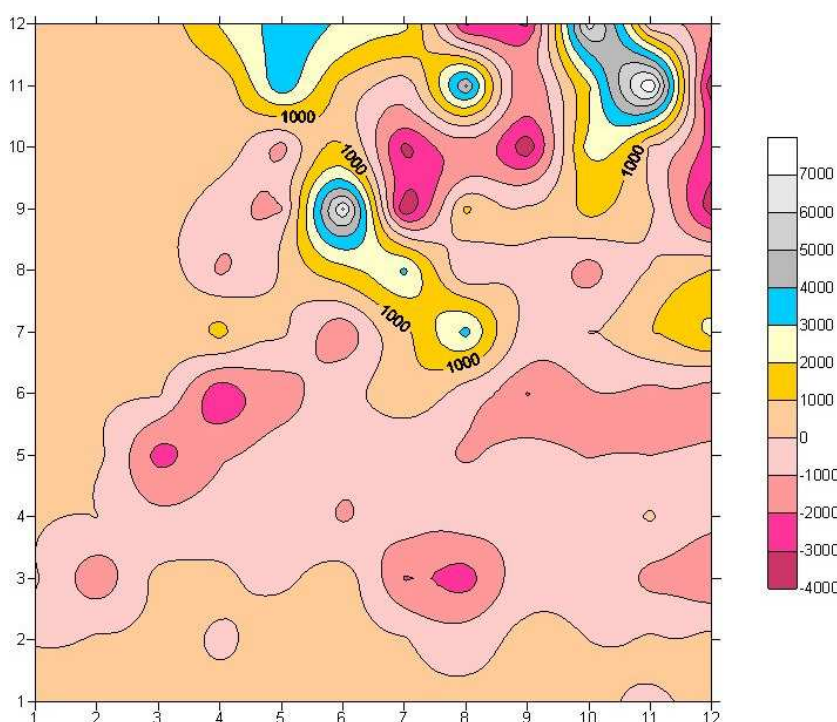


Figura 3.18: Mapa de isolinhas (número de pás em abcissa, número de camiões em ordenada) do “degrau de diferenças de *tempos totais de espera*” para as duas situações da *cv* simuladas.

3.2.5 Regresso à função objectivo

Uma vez que a abordagem anterior se mostrou inconclusiva, retomou-se a simulação das frotas *1p3c*, *2p5c*, *2p6c* e *3p9c*, no mesmo ponto em que se tinha parado; isto é: mais uma vez se foi testar a influência de alterações nos valores de *cv*, mantendo fixa a média e variando o desvio-padrão. Optou-se por apertar ainda

mais a busca – que anteriormente se situava entre $0,000001\% < cv < 25\%$ – para $0,000001\% < cv < 5\%$. No entanto, continuamos a produzir 11 simulações por frota, na medida em que se apertou igualmente o passo de amostragem para 0,5% (anteriormente era de 2,5%).

O motivo que levou a este refinamento foi o facto de já no trabalho de Miranda [Miranda, 1986] haver referência ao facto de, em determinados casos, uma simulação efectuada com um valor de cv mais elevado se traduzir num valor de produção também ele mais elevado do que para uma outra simulação em que o valor do cv é mais reduzido. Importa acrescentar que aquele autor apenas detectou esse fenómeno entre valores próximos do determinismo.

Com cada colecção de 11 valores obtidos foram, novamente, elaborados gráficos representativos de P vs p , de que é exemplo o apresentado na fig. 3.19.

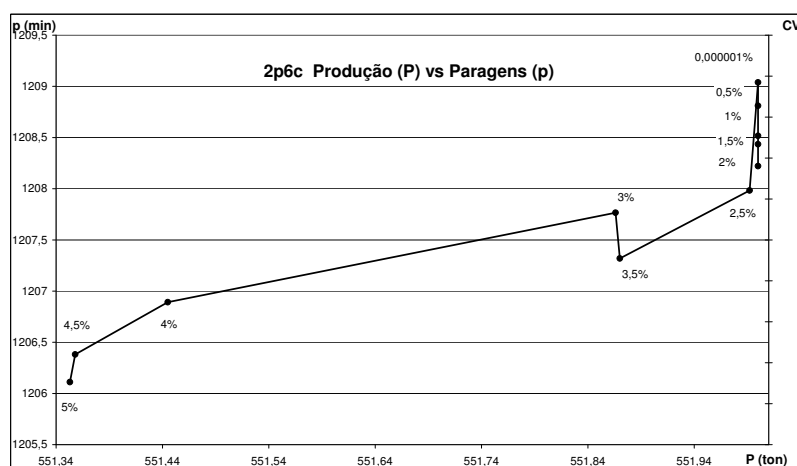


Figura 3.19: Exemplo de um gráfico demonstrativo do comportamento do somatório dos tempos de paragem em função da variação do valor da produção, incluindo respectivos valores de cv .

Tomando como exemplo o gráfico apresentado nesta figura, é possível, mais

uma vez, verificar que existem casos em que a um aumento do valor de cv corresponde um aumento da produção (P), com consequente diminuição do somatório dos tempos de inactividade (p). Isto é, ambas as “componentes” da função objectivo – fo – a concorrerem para o seu melhoramento, numa situação em que nos afastamos do determinismo. Ainda no gráfico da fig. 3.19, um exemplo deste crescimento do numerador acompanhado por um decréscimo no denominador, é a passagem do par (P, p) correspondente a $cv = 3\%$ para o par (P, p) correspondente a $cv = 3,5\%$.

No mesmo gráfico, e abrindo aqui um parêntesis para referir que o que vai ser afirmado se verifica em qualquer dos 4 gráficos elaborados (para outras tantas frotas simuladas, e que podem ser consultados nos anexos ao presente documento.), é possível detectar uma segunda zona – onde os valores de cv variam de $0,000001\%$ a 2% – com um comportamento bastante interessante em termos de fo . O que se passa é o seguinte: nesta zona, um aumento do valor do cv não implica qualquer alteração no valor da produção (P), mas implica uma descida do somatório dos tempos de paragem (p), o que, por sua vez, vai originar um incremento da fo , pois fixa-se o numerador baixando o denominador.

Para facilitar uma melhor leitura deste mais recente fenómeno, elaborou-se uma gráfico cv vs p , com os 5 pontos em que a produção se mantém constante (fig. 3.20). Os pares (cv, p) foram previamente ordenados de forma crescente do valor de cv .

O desenvolvimento do gráfico é esclarecedor: à medida que se vai caminhando no sentido oposto ao do determinismo, vai havendo menor desperdício de tempo; isto é: maior índice de aproveitamento dos equipamentos.

É possível observar que o somatório dos tempos de inactividade – p – para um $cv = 2\%$ (limite superior) é 49 segundos inferior ao caso em que $cv = 0,000001\%$ (limite inferior).

A importância relativa das duas zonas detectadas é discutível, pois apesar de na segunda (onde P se mantém inalterada e p diminui) só haver actuação numa

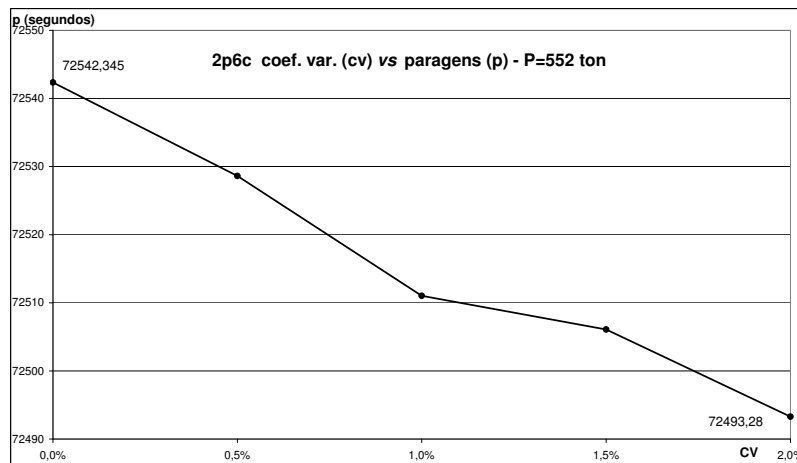


Figura 3.20: Gráfico representativo do comportamento do somatório dos tempos de paragem em função da variação do valor do cv , num caso em que a produção não sofre qualquer alteração.

componente, o que interessa é saber o “grau” ou intensidade dessa intervenção.

Começava aqui a desenhar-se a necessidade de tipificar os diferentes comportamentos dos pares (P, p) em função de cv ou, sob outra perspectiva, os diferentes tipos de trios (P, p, cv) .

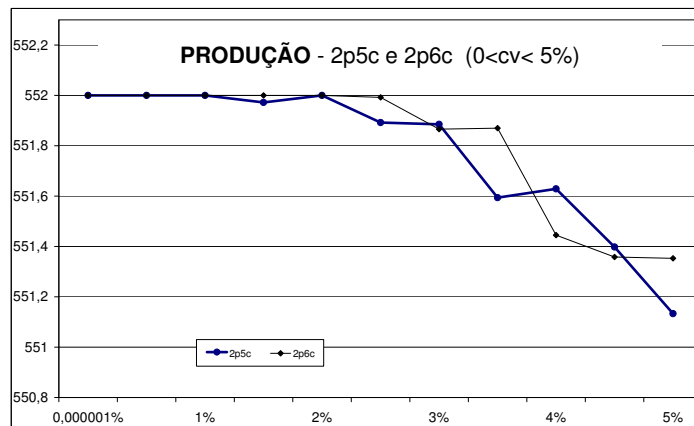


Figura 3.21: Gráfico demonstrativo do comportamento da produção em função da variação do valor do cv – frotas $2p5c$ e $2p6c$.

Se, mais uma vez, observarmos o comportamento de cada um dos componentes da fo : P e p , e, já agora, a própria fo , em face de uma variação dos valores de cv , ficaremos com uma ideia mais clara do modo como tudo evolui (figuras 3.21 a 3.27).

Da análise das figs. 3.21 e 3.22 ressalta que a tendência geral da produção (P), é de descida, apesar de algo irregular, à medida que se caminha no sentido de um cenário mais caótico. No entanto, a consulta dos gráficos das figs. 3.23 a 3.26 permite verificar o aparecimento de uma tendência idêntica no que concerne a tempos de inactividade (p), o que, em conjunto, implica um incremento na função objectivo (fo), à medida que se abandona os valores mais determinísticos (fig. 3.27).

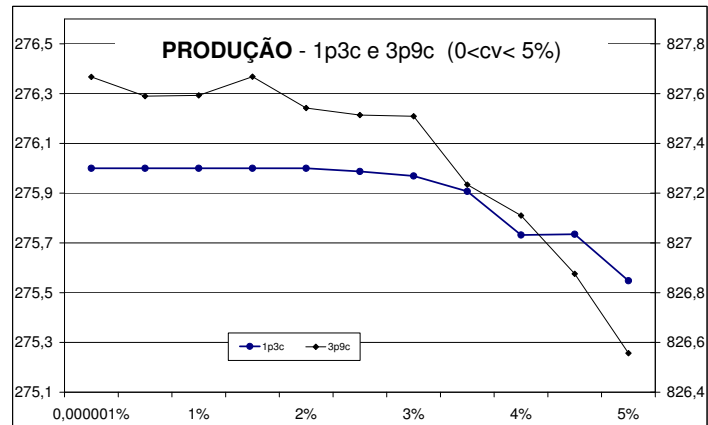


Figura 3.22: Gráfico demonstrativo do comportamento da produção em função da variação do valor do cv – frota 1p3c e 3p9c.

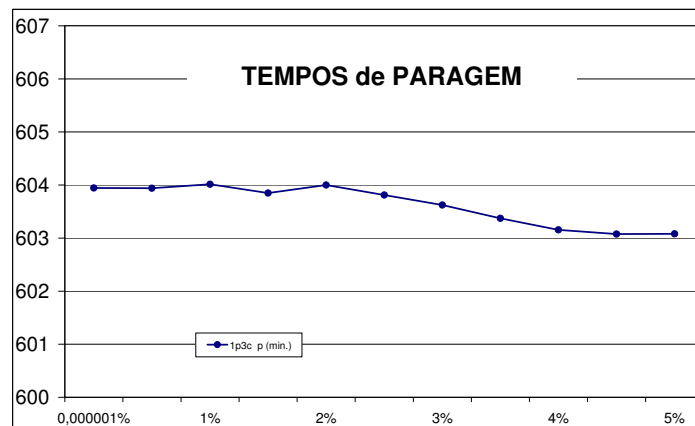


Figura 3.23: Gráfico demonstrativo do comportamento do somatório dos tempos de inatividade em função da variação do valor do cv .

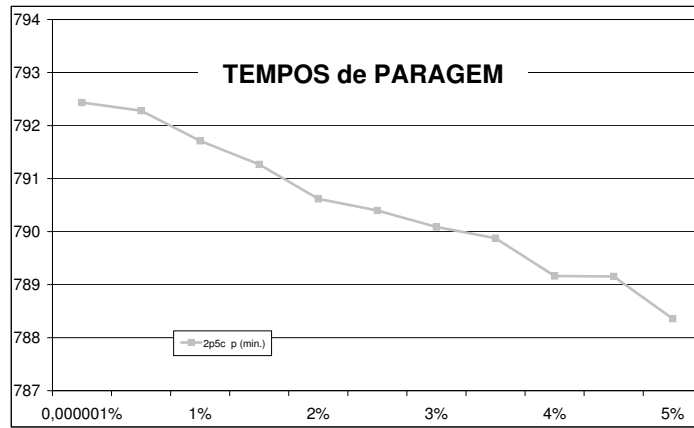


Figura 3.24: Gráfico demonstrativo do comportamento do somatório dos tempos de inatividade em função da variação do valor do cv .

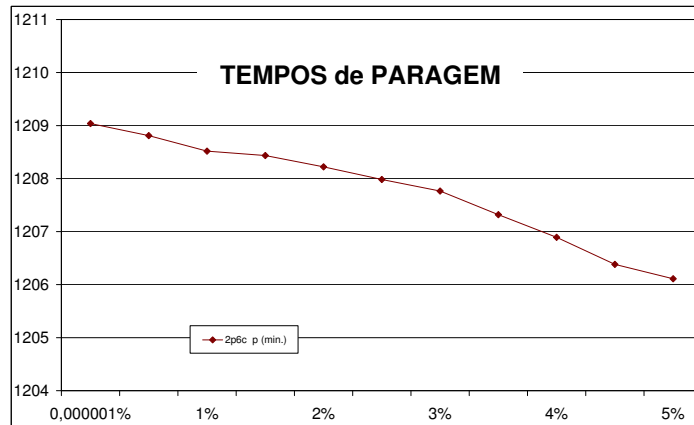


Figura 3.25: Gráfico demonstrativo do comportamento do somatório dos tempos de inatividade em função da variação do valor do cv .

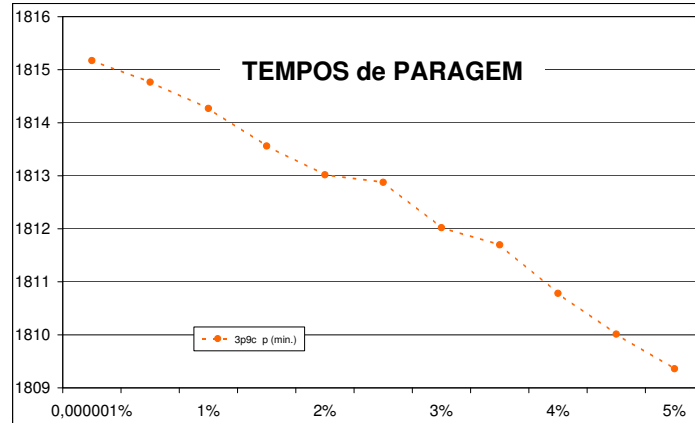


Figura 3.26: Gráfico demonstrativo do comportamento do somatório dos tempos de inatividade em função da variação do valor do cv .

Ressaltou daqui a necessidade/vontade de fazer um “zoom” ainda mais apertado, isto é, ainda no intervalo $0,0000001\% < cv < 5\%$, mas desta feita com passo 0,25%, o que viria a dar origem a 21 simulações por frota. Optou-se, ainda, por abrir as simulações a mais uma frota – $4p12c$, por se tratar de uma configuração que também integra a *linha de crista* da fig. 2.6.

A intenção foi a de tentar associar zonas específicas a cada fenómeno: aumento da produção conjugado com uma diminuição dos tempos totais de espera ($\uparrow P \wedge \downarrow p$) e diminuição dos tempos totais de espera conjugada com uma produção constante ($= P \wedge \downarrow p$), bem como tentar identificar e isolar outros fenómenos/combinções relevantes.

Se em relação ao fenómeno “ $\uparrow P \wedge \downarrow p$ ”, é difícil associar uma determinada zona, visto que ela é inconstante de frota para frota, já relativamente ao fenómeno “ $= P \wedge \downarrow p$ ”, ele ocorre sempre (nas frotas em que foi identificado) numa gama de valores que se situa nas proximidades do valor mais determinístico simulado.

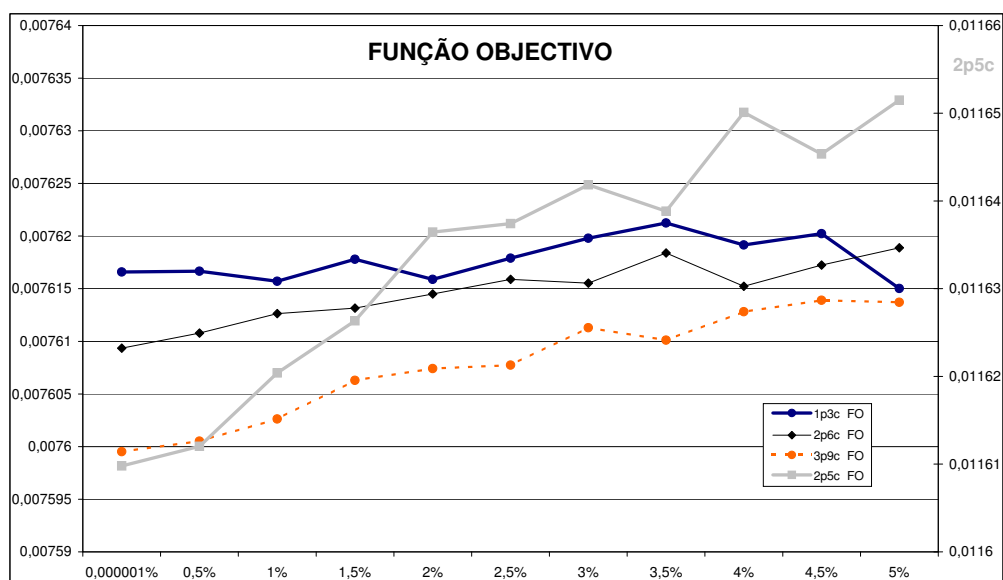


Figura 3.27: Gráfico demonstrativo do comportamento da função objectivo em função da variação do valor do cv .

Simulação 0 a 5% (passo 0,25%)	zona 1 $\uparrow cv \Rightarrow \begin{cases} < P \\ > P \end{cases}$	zona 2 $\uparrow cv \Rightarrow \begin{cases} < P \\ = P \end{cases}$
1p3c	4% - 4,25%	0,000001% - 2,5%
2p5c	2,5% - 2,75% 3,75% - 4% 4,25% - 4,5%	0,000001% - 1,25%
2p6c	3,25% - 3,5% 4,75% - 5%	0,5% - 2%
3p9c	0,25% - 0,75% 1,25% - 1,75% 2% - 2,25% 2,5% - 2,75% 4,75% - 5%	
4p12c	0,000001% - 0,25% 0,5% - 0,75% 1% - 1,25% 1,5% - 1,75% 2% - 2,5% 3% - 3,25% 3,5% - 3,75% 4% - 4,5% 4,75% - 5%	

Figura 3.28: Comportamento do par (P, p) nas 5 frotas analisadas.

Para facilitar a análise, considerou-se uma primeira zona: *zona móvel*²⁶ ($\uparrow P \wedge \downarrow p$), e uma segunda zona: *zona fixa*²⁷ ($= P \wedge \downarrow p$).

No quadro da fig. 3.28 estão registadas, para cada frota, as ocorrências de cada um dos dois fenómenos que tem vindo a ser referidos, sendo possível verificar que existe uma *zona móvel* em todas as frotas simuladas enquanto que a zona fixa tem ocorrência em 3 das 5 frotas estudadas.

3.2.6 Produção *versus* tempos de inactividade

Em face dos resultados obtidos se, por um lado, parecia mais ou menos evidente que “o fenómeno existia”; isto é: foram inequivocamente identificados casos nos quais ao caminhar-se de um cenário mais determinístico para um mais desordenado se obtinham melhores produções, também era verdade que não tinha ainda sido possível identificar um padrão. Restava uma alternativa, apesar de muito morosa: estudar todas as possíveis combinações de até 4 pás e até 12 camiões, isto é 48 frotas, fazendo variar o *cv* no intervalo $[0,000001\%; 5\%]$, com passo de 0,25%. O que significava 1008 simulações.

Com o objectivo de isolar e tipificar diferentes comportamentos dos pares (P, p) em função de variação do *cv*, foram postas à consideração as seguintes hipóteses de comportamento de P e p , à medida que se transitava gradualmente de um cenário mais determinístico para um mais desordenado:

- hipótese 1: $\uparrow P \wedge \downarrow p$ ^{28 29 30}
- hipótese 2: $\uparrow P \wedge = p$
- hipótese 3: $\uparrow P \wedge \uparrow p$
- hipótese 4: $= P \wedge \downarrow p$

²⁶ Assim designada por, apesar de estar presente nas 5 frotas testadas, ocorrer em diferente intervalos de variação de *cv*.

²⁷ Assim designada por ocorrer sempre em gamas de *cv* próximas do determinismo.

²⁸ O sinal \uparrow significa aumento.

²⁹ O sinal \downarrow significa diminuição.

³⁰ O sinal $=$ significa que se mantém constante.

- hipótese 5: $= P \wedge = p$
- hipótese 6: $= P \wedge \uparrow p$
- hipótese 7: $\downarrow P \wedge \downarrow p$
- hipótese 8: $\downarrow P \wedge = p$
- hipótese 9: $\downarrow P \wedge \uparrow p$

Após algumas semanas de simulações, obtivemos uma colecção de valores que nos permitiu analisar a existência de cada uma das 9 hipóteses acima indicadas.

Ao querermos saber se um determinado fenómeno – comportamento conjunto de P e p – ocorre ou não em face da variação do valor do cv , estamos a trabalhar com 4 variáveis. Para facilitar a leitura, os dados obtidos foram ordenados por ordem crescente dos valores de cv , não só porque se pretendia analisar os acontecimentos ocorridos ao caminhar-se no sentido de menor determinismo, mas também porque a variável cv varia de forma regular, o que permite centrar as atenções nas restantes três variáveis.

Uma primeira leitura permitiu concluir que o somatório dos tempos de inatividade nunca se mantém constante, isto é, as hipóteses 2, 5 e 8 nunca ocorrem. Como consequência, das 9 hipóteses iniciais reduziu-se o estudo a 5 diferentes casos:

caso 1: $\uparrow cv \Rightarrow \uparrow P \wedge \downarrow p$ É, no fundo, a situação que desencadeou esta busca: um aumento da aleatoriedade³¹ implica um aumento de P e uma diminuição de p , isto é, actuação favorável nas duas componentes da fo .

caso 2: $\uparrow cv \Rightarrow \uparrow P \wedge \uparrow p$ É uma situação que ainda não foi referida, mas de análise pertinente, pois se o comportamento de p é o esperado, o de P não o é. Só uma análise comparativa de P e p caso a caso, permite saber o comportamento da fo .

³¹Tal como aconteceu anteriormente com o termo “caótico”, utilizaremos por vezes a expressão “aleatoriedade” para designar situações opostas ao determinismo.

caso 3: $\uparrow cv \Rightarrow = P \wedge \downarrow p$ Esta situação já foi referida: um aumento do valor do cv não implica qualquer alteração no valor de P , mas implica uma descida de p , o que, por sua vez, vai originar um incremento da fo , pois fixa-se o numerador baixando o denominador.

caso 4: $\uparrow cv \Rightarrow \downarrow P \wedge \downarrow p$ É mais uma situação que ainda não foi referida, mas que importa analisar, pois se o comportamento de P é o esperado, o de p não o é. Só uma análise comparativa de P e p caso a caso, permite saber o comportamento da fo .

caso 5: $\uparrow cv \Rightarrow \downarrow P \wedge \uparrow p$ ou $= P \wedge \uparrow p$ Estão englobadas neste último caso as duas restantes situações e que constituem, por uma lado, o esperado em face de um aumento do cv e, por outro, os cenários desfavoráveis sob o ponto de vista da fo .

Uma análise exhaustiva das simulações permitiu enquadrar todas as situações num dos 5 casos supra referidos.

Numa primeira tentativa de visualização dos fenómenos foi elaborado o esquema cromático representado na fig. 3.29.

Salvaguardando o facto de, ao iniciarmos no presente trabalho a fase de simulações, termos ido em busca de esclarecimentos para determinadas suspeições, a verdade é que num algoritmo que esperamos represente de forma satisfatória o sistema em causa, a expectativa é a de que à medida que nos aproximamos de um funcionamento em regime de características mais determinísticas, o resultado aponte para aumentos quer de produção, quer do índice de aproveitamento dos equipamentos.

Serve este preâmbulo para evitar que uma eventual análise precipitada do esquema cromático da fig. 3.29 permita inferir que este será de difícil leitura, ou mesmo desprovido de qualquer sentido prático. Na verdade, das diferentes leituras que a partir dele podem ser efectuadas, uma de imediato se destaca: a consta-

tação de que os espaços em branco – que representam a expectativa dita de bom senso (caso 5) – constituírem apenas cerca de 33% dos casos. Este dado significa que podemos, nesta fase, afirmar que, neste tipo de sistemas, uma aproximação ao determinismo não implica inequivocamente um melhoramento dos resultados finais pretendidos. E esta deverá ser uma importante conclusão a reter.

Se, quanto à definição da presente *função objectivo*, em consequência de uma das suas componentes – p – se possa admitir discordância na selecção do nome *função objectivo*³², quanto ao facto de em cerca de 35% dos casos uma aproximação ao determinismo implicar uma diminuição do valor da produção, não restam dúvidas de que é um resultado inesperado e, sob o ponto de vista de processo produtivo, indesejado.

O facto de se associar a cada trio (NP^{33}, NC^{34}, cv) a ocorrência ou não de determinado fenómeno, significa que temos quatro coordenadas e, consequentemente, uma representação a quatro dimensões. Na realidade, uma das coordenadas pode ser considerada booleana (ocorre ou não ocorre determinado fenómeno), o que permite uma representação tridimensional onde, a cada trio ordenado de valores (NP, NC, cv) se faz corresponder, não um ponto, mas sim um pequeno cubo que será opaco ou translúcido, em função de o fenómeno que procuramos ocorrer ou não. Se quisermos observar não um mas sim os cinco fenómenos (as cinco hipóteses de comportamento do par (P, p) em função de um aumento de cv) em simultâneo, a mesma representação pode ser utilizada, bastando para isso associar uma diferente cor a cada caso, visto que eles são mutuamente exclusivos. A figura 3.30 corresponde a um exemplo do tipo de representação que acaba de ser

³²Seleccionar p para denominador de uma *função objectivo* significa o mesmo que dizer que quanto mais reduzido for o valor do *somatório dos tempos totais de inactividade* mais elevado (favorável) se torna o valor de f_o . Entende-se, consequentemente, que um elevado índice de aproveitamento dos equipamentos é uma situação desejada. Na realidade, este é um ponto de vista discutível, pois quanto menor utilização tiver o equipamento, maior a sua vida útil, pelo que o facto de haver muitos tempos de paragem não poderá, por si só, e sob o ponto de vista produtivo, significar menor rendibilidade. Pode, isso sim, reflectir uma menor racionalidade na selecção dos equipamentos, mas isso são contas de um outro rosário.

³³Número de pás (unidades carregadoras).

³⁴Número de camiões (unidades transportadoras).



Figura 3.29: Esquema representativo do comportamento do par (P, p) nas 48 frotas analisadas.

referida.

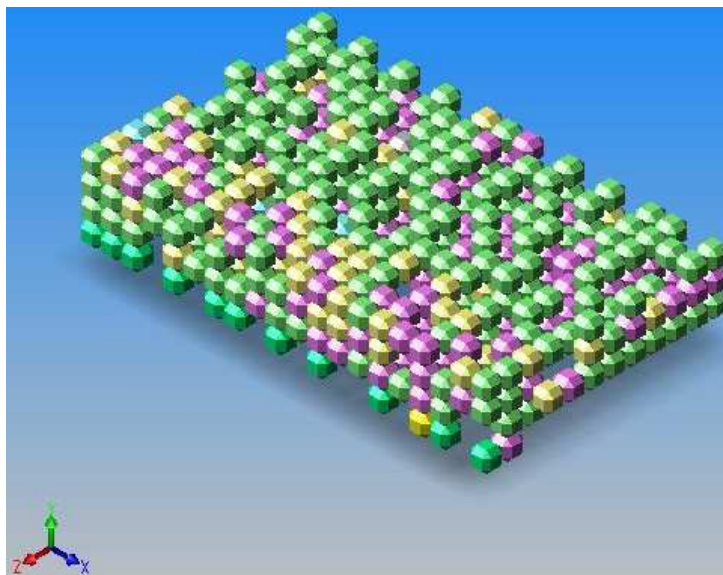


Figura 3.30: Esquema representativo dos 5 casos identificados de possível comportamento do par (P, p) , em função da variação do cv . Dados relativos a 48 frotas e em que o eixo dos xx corresponde aos 21 valores de cv simulados, o eixo dos yy corresponde ao número de unidades carregadoras e o eixo dos zz corresponde ao número de unidades transportadoras.

Se, por um lado, se conseguiu idealizar e construir uma representação conjunta da globalidade dos dados obtidos, não é menos verdade que nos deparamos com uma incapacidade de leitura concludente deste tipo de gráfico. Na realidade, apesar de a fig. 3.30 ser uma representação mais elegante do que a fig. 3.29, a dificuldade de interpretação dos desenvolvimentos das manchas coloridas, até devido à sua densidade, acabou por não transformar esta última representação numa mais valia evidente. Todavia, numa tentativa de assimilar melhor o pendor de cada um dos diferentes 5 *casos*, foram elaborados quatro diferentes esquemas, representativos de outros tantos *casos* – figuras 3.31 a 3.34. Importa acrescentar que o *software* utilizado para elaboração destes esquemas permite animação, o que acaba, apesar do que foi dito, por facultar uma leitura mais límpida dos mesmos.

Reflectindo um pouco sobre as palavras do parágrafo que acaba de ficar para

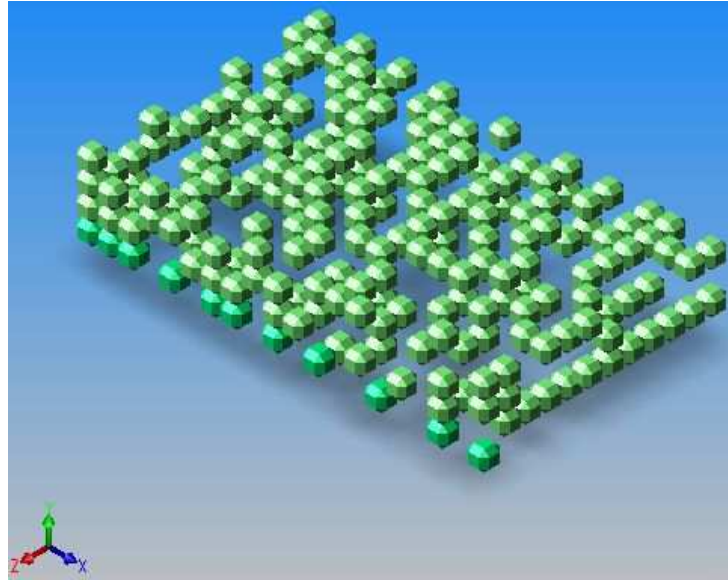


Figura 3.31: Representação parcial do esquema da fig.3.30. *Caso 1:* $\uparrow cv \Rightarrow \uparrow P \wedge \downarrow p$.

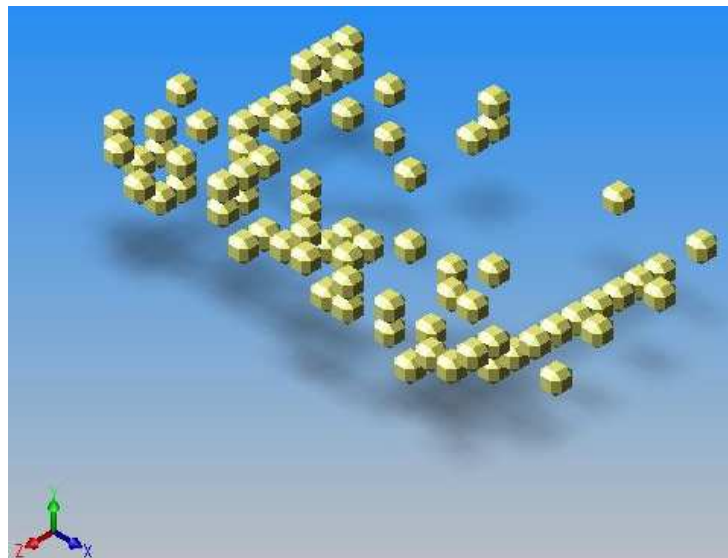


Figura 3.32: Representação parcial do esquema da fig.3.30. *Caso 2:* $\uparrow cv \Rightarrow \uparrow P \wedge \uparrow p$.

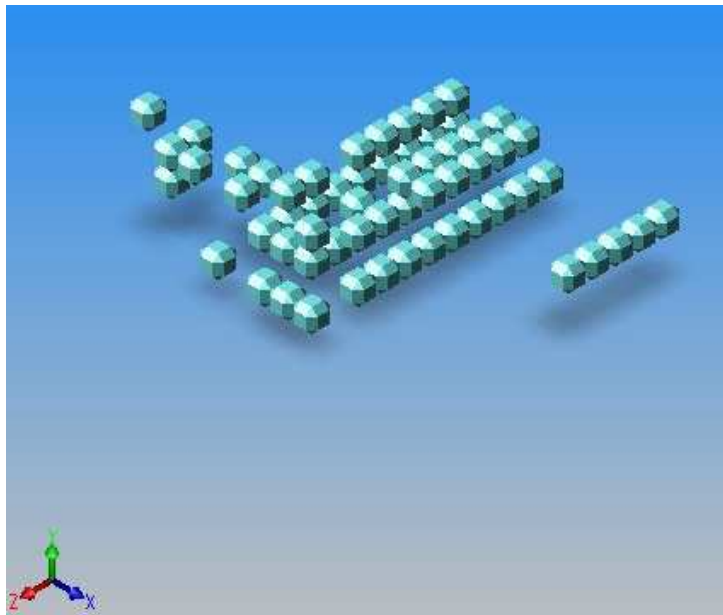


Figura 3.33: Representação parcial do esquema da fig.3.30. *Caso 3:* $\uparrow cv \Rightarrow = P \wedge \downarrow p$.

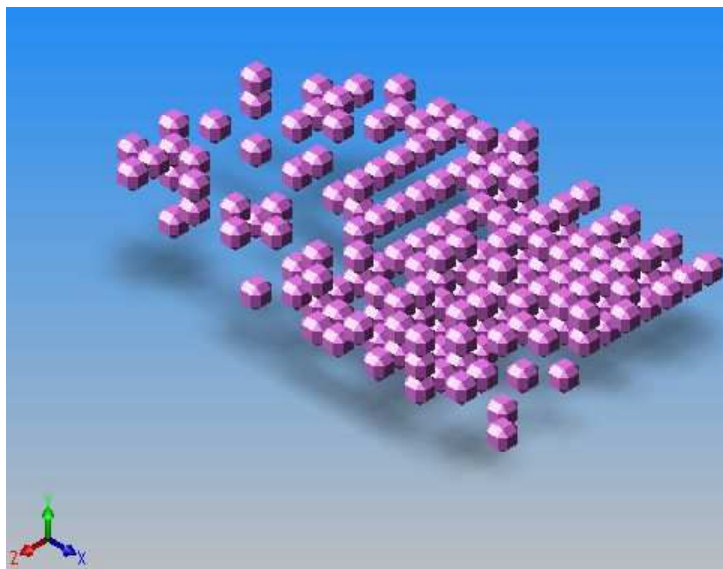


Figura 3.34: Representação parcial do esquema da fig.3.30. *Caso 4:* $\uparrow cv \Rightarrow \downarrow P \wedge \downarrow p$.

trás, salienta-se, como salvaguarda do trabalho produzido, o facto de termos detectado casos em que os resultados obtidos contrariavam as expectativas ditas de *bom senso*; sendo que, para além desse fenómeno ser de dimensão assinalável – parece estar amplamente disseminado e existir sob variados aspectos – foi-nos possível traduzi-lo numericamente e mostrá-lo graficamente.

O que nesta fase se mostrava infrutífero era a procura de padrões comportamentais que nos permitissem descortinar alguma ordem por detrás destes fenómenos aparentemente caóticos. Isto é: por agora, a busca de um padrão presente em todo o comportamento irregular teria que continuar.

Abria-se, deste modo, a porta para um novo rumo nos trabalhos exploratórios do nosso modelo, que nos levaria a percorrer os caminhos ilustrados no próximo capítulo deste trabalho.

Capítulo 4

Escalas e Padrões

*“...a procura de leis explicativas nos factos
naturais procede de modo tortuoso.
Diante de alguns factos inexplicáveis,
deves tentar imaginar muitas leis
gerais, cuja conexão com os factos
de que te ocupas não vês ainda:
e, de repente, na conexão imprevista
de um resultado, um caso e uma lei,
perfila-se a teus olhos um raciocínio
que te parece mais convincente
que os outros. Tentas aplicá-lo a
todos os casos semelhantes, usá-lo
para dele extrair previsões, e descobres
que tinhas adivinhado. Mas,
até ao fim, nunca saberás quais
os predicados a introduzir no teu
raciocínio e quais deixar cair”*

Guilherme de Baskerville

Neste capítulo continua-se a busca de comportamentos inesperados das variáveis P e p . Enquanto o capítulo anterior foi dedicado à prova da sua existência, no presente perseguimos padrões comportamentais, com a ambição última de determinação de uma regra para a sua definição.

4.1 Redimensionamento da escala

4.1.1 A frota 2p6c

Chegados a esta fase do percurso, duas evidências iriam presidir às imediatas tomadas de decisão: por um lado, a detecção de um fenómeno comportamental presente, sob variados aspectos, em diversas frotas simuladas; e por outro, a consciência da impossibilidade funcional de continuar a trabalhar “em cima” de tão elevado número de configurações.

Porque, como foi já realçado, o presente trabalho pretendia, desde a primeira hora, constituir-se como continuidade de uma determinada linha de investigação, procurou-se uma frota que constituísse denominador comum, não só dos trabalhos precedentes, mas também, já agora, do caminho até aqui percorrido.

A escolha recaiu sobre a frota 2p6c, seleccionada por cumprir o critério da razão de uma pá carregadora por cada três unidades transportadoras, estabelecido pelo modelo de Miranda [Miranda, 1986], por ser uma das frotas óptimas encontradas pelo modelo de Leite [Leite, 1998], e por se incluir no alinhamento anteriormente definido como *linha de crista*; para além de, no presente trabalho, evidenciar o fenómeno que tem vindo a ser salientado: comportamentos inesperados das variáveis P e p .

Seleccionada a frota, houve que recolher e reorganizar toda a informação que acerca da mesma, e até ao momento, tinha sido produzida. Desta forma, o gráfico da figura 3.19, serviu como ponto de partida para mais uma etapa de simulações, devido ao comportamento da f_o na transição de $cv = 3\%$ para $cv = 3,5\%$ (onde,

como foi já referido, se verifica um incremento da produção, aliado a um decréscimo do valor do somatório dos tempos totais de inactividade). Esse tramo $3\% < cv < 3,5\%$, foi, por esse motivo, o seleccionado para detalhar as averiguações. O passo de amostragem foi refinado para 0,05% (anteriormente foi de 0,5%).

Com os valores obtidos construiu-se o gráfico da figura 4.1, onde cada ponto é a média resultante de 1000 simulações. Cada simulação representa um relevo, ou seja 8 horas de trabalho.

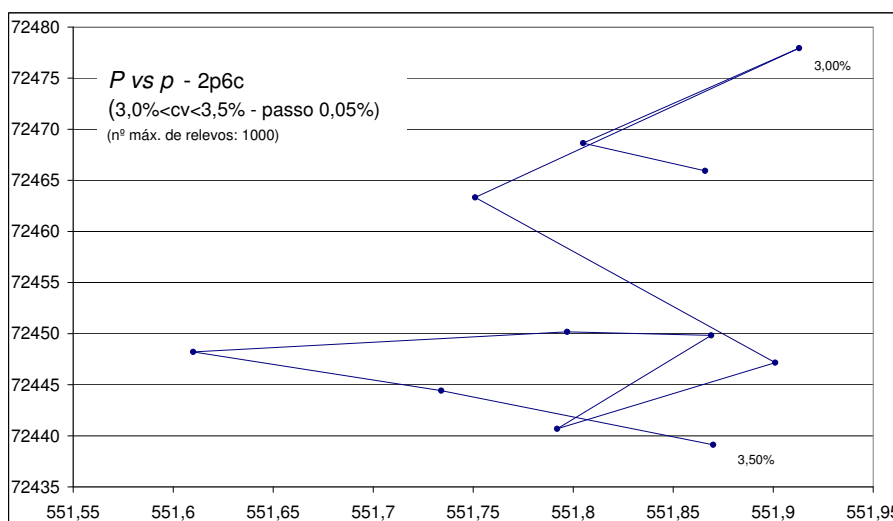


Figura 4.1: Gráfico demonstrativo do comportamento do somatório dos tempos de paragem e do valor da produção, em função da variação do valor de cv (P em abcissa; p em ordenada).

A trajectória definida pelo gráfico é tradutora da existência de fenómeno dentro de fenómeno; isto é: quando se re-dimensiona a escala, continua a ser possível identificar quatro dos cinco casos definidos anteriormente. O caso 5 ($\uparrow cv \Rightarrow$

$\downarrow P \wedge \uparrow p$ ou $= P \wedge \uparrow p$), que seria o esperado em condições normais, apenas se verifica em dois do dez tramos do gráfico, o que significa que em 80% dos casos o comportamento de pelo menos uma das variáveis – P e p – é contrário ao que seria suposto acontecer.

Perante este cenário, refinou-se ainda mais a busca dentro do mesmo intervalo, apertando-se o passo para 0,025% (anteriormente foi de 0,05%), o que se traduziu em 21 diferentes simulações. O gráfico resultante é apresentado na figura 4.2.

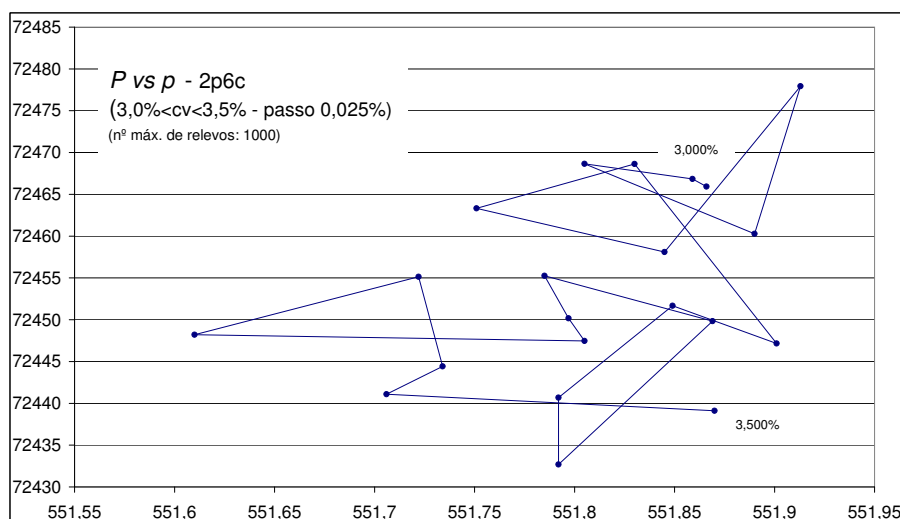


Figura 4.2: Gráfico demonstrativo do comportamento do somatório dos tempos de paragem e do valor da produção, em função da variação do valor de cv (P em abcissa; p em ordenada).

O gráfico da figura 4.3 (no qual se optou por um traçado *a sentimento*, para evitar sobreposições, facilitando, deste modo, a leitura independente embora comparativa das duas situações) permite-nos arriscar que o comportamento das variáveis P e p não é dependente do grau de detalhe com que é feita a observação. No

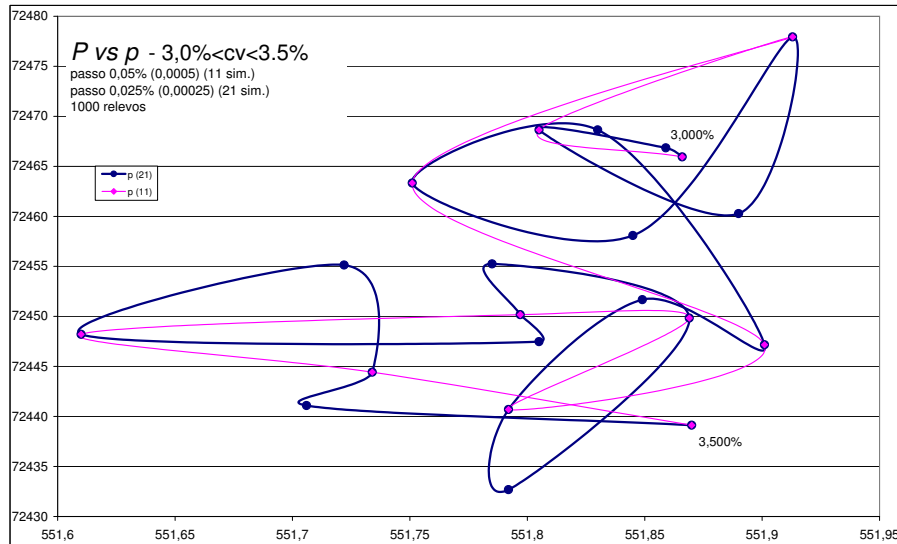


Figura 4.3: Gráfico conjunto, demonstrativo do comportamento de P e p , em função da variação do valor de cv , para 11 e para 21 simulações.

entanto, se há uma reprodução do comportamento a diferentes escalas, talvez se possa falar numa dimensão fractal¹, sob o ponto de vista do comportamento; isto é: quando se refina – com um *zoom* mais “apertado” – a observação, verifica-se que o supra referido *caso 5*: situação esperada, apenas ocorre em 6 dos 20 tramos resultantes da representação gráfica; o que corresponde a apenas 30% dos casos representados.

¹A palavra *fractal*, que derivando do latino *fractus* significa algo como *quebrado* ou *irregular*, foi introduzida por Benoît Mandelbrot, para classificar formas geométricas – presentes em múltiplos elementos da natureza – cujos padrões se mantêm, independentemente da escala de observação.

Num *fractal* as partes tem a mesma forma ou estrutura que o todo, estando todavia a uma escala diferente e, eventualmente, um pouco deformadas. A sua forma é, ou extremamente irregular, ou extremamente interrompida e fragmentada, tal como todo o resto, independentemente do *zoom* utilizado.

A *dimensão fractal* refere-se mais especificamente ao grau de irregularidade e fragmentação de um conjunto geométrico ou de um objecto natural sendo, pois, quantificável.

Sob o ponto de vista da expectativa (probabilidade) de comportamento das variáveis P e p em função da variação de cv , um maior detalhe não trouxe novidades significativas. É precisamente sob esse prisma que nos surgem dúvidas quanto a um eventual comportamento fractal: não tem a ver com a estrutura geométrica, a forma ou superfície gerada, mas antes com as semelhanças dos resultados produzidos a diferentes escalas de observação. Doutra forma: não nos referimos ao substantivo, mas antes ao adjetivo *fractal*.

Esta perspectiva – de entrada num campo para o qual o presente trabalho não tinha sido estruturado – despertava um duplo sentido de curiosidade e cautela; responsáveis conjuntos pelas tomadas de decisão que se seguiram.

4.1.2 Validação do cálculo

Em todas as fases de uma simulação é imperioso ter presente a necessidade de discernir as diferenças entre o processo de simulação e o fenómeno ou sistema que se espera que ele represente. Sendo do senso comum que um trabalho deste tipo é feito de avanços e recuos, importa assegurar que a progressão seja feita com segurança. Retirar conclusões relativas a dados obtidos de uma qualquer simulação é bem diferente de extrapolar essas mesmas conclusões para o sistema que se pensa que o programa simula.

Há que ter, também, presente que as soluções numéricas não são, em geral, exactas. Há quantidades que não podem ser expressas num número finito de dígitos, pelo que ficam sujeitas a um erro de arredondamento, necessário quer ao seu armazenamento, quer ao seu tratamento posterior numérico.

À parte os erros de arredondamento, a determinação de uma solução é, por vezes, obtida como limite de um processo infinitamente longo: método iterativo. A interrupção, em qualquer que seja o ponto, dum processo de cálculo que deveria prosseguir indefinidamente, dá também origem a incorrecções: erros de truncatura.

Tendo presente este alerta, nesta fase do trabalho aumentou-se a precisão do

cálculo, actuando em duas frentes: estreitou-se o canal de confiança de estabilização das médias², e aumentou-se o número de relevos por simulação.

Em termos de vida útil da exploração mineira, testamos valores demasiado elevados; no entanto, perante a possibilidade de uma questão de precisão, era fundamental que nos debruçássemos sobre o problema numérico, sob pena de não podermos vir a validar posteriormente o cálculo.

Esta foi a fase mais morosa do processo de simulação e que implicou a mais profunda reestruturação do programa *AL9701*, que deu origem ao *ALJP0302*. O canal de confiança – *cc* – passou, gradualmente, de 0,5% para 0,005%, enquanto que o número de relevos considerados por simulação, chegou aos 2000000. Foi necessário, entre outras coisas, acelerar o processo de simulação, retirando tudo o que, naquela fase, pôde ser considerado supérfluo, desde simples *écrans* até determinados *outputs*.

Com o anterior limite máximo imposto de 1000 relevos, nunca se conseguiu uma estabilização dentro do canal de confiança – 0,5% – estabelecido. Ainda assim, avançou-se para uma simulação com limite máximo de 32000 relevos.

Vários caminhos alternativos foram ensaiados, tendo sido um deles a mudança de frota. Testou-se a configuração *2p5c*, por se situar na *linha de crista* quer de *produções* quer de *produtividades* no trabalho de Leite [Leite, 1998], e por, ao contrário da frota *2p6c*, estabilizar dentro de um *cc* de 0,5% (para 1000 relevos). Para esta nova frota seleccionou-se o troço definido no intervalo $3,5\% < cv < 4\%$, por ter dimensão e comportamento de *P* e *p* semelhante ao da frota *2p6c* no intervalo $3\% < cv < 3,5\%$. O canal de confiança foi sendo gradualmente estreitado de 0,5% para 0,05% e posteriormente para 0,025%, e o número de relevos aumentado até aos 32000. Obteve-se sempre uma estabilização, até que se estreitou o *cc* para 0,005%, valor para o qual a estabilização deixou de existir.

²De acordo com o que foi já aclarado em capítulo anterior, o algoritmo *AL9701* considera haver estabilização dos dados relativos às frequências dos níveis de tolva, quando a classe de nível onde se encontra a moda das frequências coincidir aproximadamente com a classe de nível correspondente ao nível médio da respectiva tolva. Este “coincidir aproximadamente” está dependente do canal de confiança – *cc* – estabelecido.

Ainda foram testadas outras duas frotas – $4p2c$ e $3p2c^3$ – nas mesmas condições, mas ao chegar-se a um $cc = 0,00005$, havia sempre alguns dos 21 pontos simulados que não estabilizavam antes de atingir o limite máximo de 32000 relevos impostos.

A alternativa passava, obviamente, por alterar o programa *ALJP0302*, de modo a que fosse possível simular um maior número de relevos. Após resolvida essa limitação regressou-se à frota $2p6c^4$ e iniciou-se nova etapa de simulações, em que se foi, progressivamente, apertando o cc até 0,005% e alargando o número de relevos por simulação até se atingir um total de 2000000. Na figura 4.4 apresenta-se um gráfico comparativo e resumido daquilo que foi esse moroso percurso de simulações.

Neste gráfico, o cenário de 1000 relevos apresenta um comportamento tão distinto dos restantes três que acaba por dificultar a leitura; motivo pelo qual se apresenta o gráfico da figura 4.5 que, à custa de um re-dimensionamento da escala, se consegue uma leitura mais fácil.

Da análise dos gráficos das figuras 4.4 e 4.5, ressalta o facto de passar a haver uma regularização à medida que se vai aumentando o número de relevos por simulação. O facto é que a totalidade dos quatro diferentes *casos* de comportamento combinado, e supostamente não esperado, do par (P, p) vai deixando de existir à medida que se vai aumentando o número de relevos.

Na simulação em que foram considerados dois milhões de relevos, na passagem de um qualquer valor de cv para outro superior, isto é, à medida que se vai aumentando a desordem, deixa de haver situações de aumento de produção. No entanto, não deixa de ser curioso que, numa situação análoga, o somatório dos

³Propositadamente fora da *linha de crista*, com o intuito de averiguar se o comportamento das frotas na *zona de patamar* seria diferenciado. No entanto, o traçado dos gráficos demonstrativos do comportamento de P vs p nestas duas frotas (e, já agora, da frota $2pc5$) traduzia a existência dos 5 *casos* definidos anteriormente.

⁴Não apenas pelos motivos já justificados no início do presente capítulo, mas ainda porque entretanto se apresentava, nesta fase, como sendo a configuração acerca da qual possuímos mais informação.

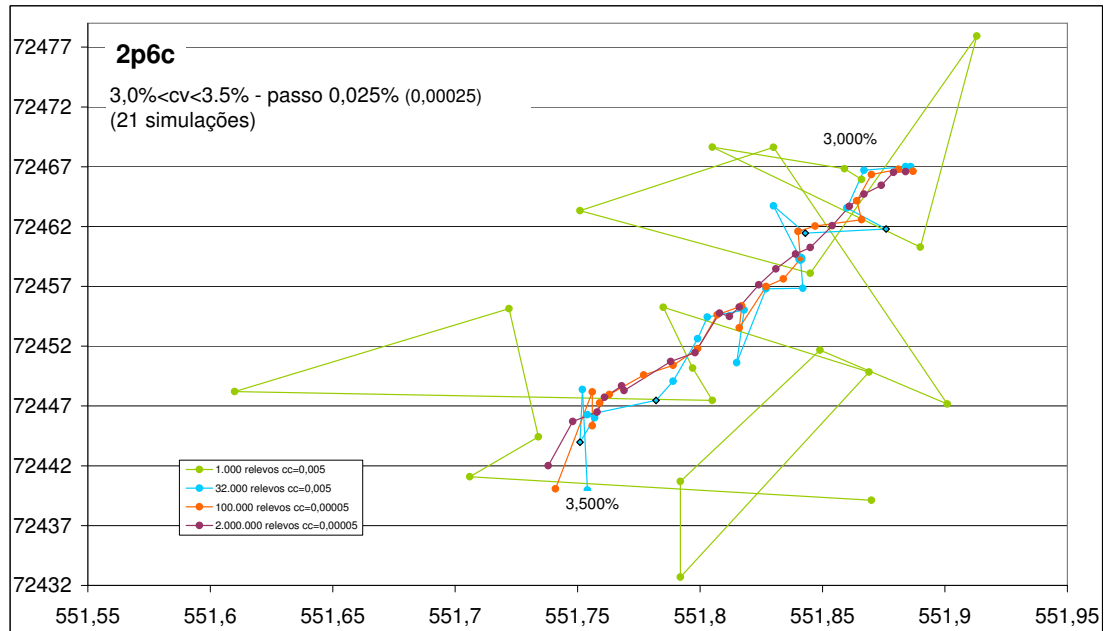


Figura 4.4: Gráfico conjunto, ilustrativo do comportamento de P e p , em função da variação do valor de cv , no intervalo $3\% < cv < 3,5\%$ (quatro diferentes cenários).

tempos totais de inactividade sofra sempre um decréscimo. Apenas a análise conjunta de P e p , se tornou reveladora do comportamento da função objectivo. Desse facto é ilustrativo o gráfico da figura 4.6.

O que o gráfico da figura 4.6 deixa claro é a existência de uma tendência para a regularização à medida que se aumenta o número de relevos simulados mas, mais importante e curioso que isso, que a tendência, em qualquer dos casos, é sempre de crescimento da fo quando se caminha no sentido de uma maior desordem.

O fenómeno parece começar a estabilizar ao fim de 2000000 relevos (8000 anos de operação da pedreira!), o que, sob o ponto de vista de simulação de siste-

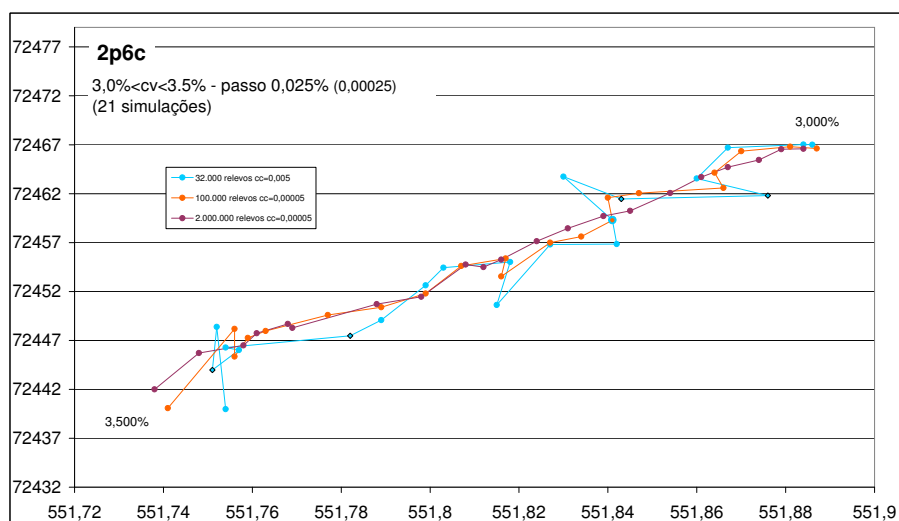


Figura 4.5: Gráfico conjunto, demonstrativo do comportamento de P e p , em função da variação do valor de cv , no intervalo $3\% < cv < 3,5\%$ (três diferentes cenários).

mas de carga e transporte pode parecer não ter interesse. No entanto, a informação fornecida pela leitura deste gráfico impeliu-nos a continuar a busca de dados que suportassem a evidência da existência de um fenómeno inesperado. Se, de facto, deixa de haver situações de aumento de produção à medida que se caminha para um cenário de maior desordem, não é menos verdade que a função objectivo sofre incrementos sucessivos e tem mesmo tendência geral de subida. Fica esse facto a dever-se a uma diminuição do denominador: somatório dos tempos totais de inactividade.

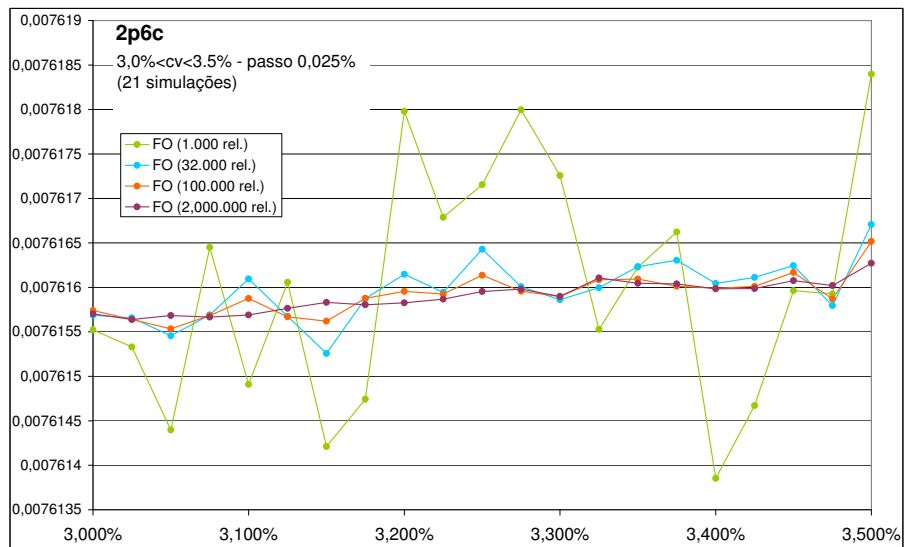


Figura 4.6: Gráfico conjunto, demonstrativo do comportamento da função objetivo, em função da variação do valor de cv , no intervalo $3\% < cv < 3,5\%$ (quatro diferentes cenários).

4.1.3 Uma perspectiva social(ógica)

O que o trabalho até esta fase desenvolvido mostra é que, embora o comportamento de P e p em função da alteração da variabilidade com que são efectuadas as actividades que constituem o sistema em estudo, possa caminhar em direcções imprevisíveis, não restam muitas dúvidas de que quando o resultado da simulação é obtido como média de inúmeros relevos (no presente caso foram testados 2000000) o resultado passa a ser mais facilmente previsível.

E, se é verdade que, nestas condições, um aumento do determinismo acaba por se reflectir num aumento de produção, não é menos verdade que esse aumento de P surge aliado a um incremento de p . Pensamos haver legitimidade para concluir que, pelo menos no intervalo de variação de cv por nós analisado, o mais elevado

valor de produção é obtido com o mais elevado valor de somatório dos tempos totais de inactividade.

A conclusão simplista de que é obrigatório haver paragens para que haja boa produção, suscita-nos um encadeado de conclusões: os tempos de paragem que tem sido rotulados como sendo um sub-produto resultante da actividade geral do sistema, deverão, eventualmente, assumir eles próprios o estatuto de actividade, cuja existência é, afinal, fundamental e não nefasta à obtenção de objectivos produtivos.

Sendo consensual que nos sistemas de carga e transporte não existe um funcionamento do tipo “mecanismo de relógio”, torna-se desde o princípio evidente a inevitabilidade da existência de pausas. A universal aceitação deste facto, aliada à nossa recente constatação de que conseguimos um máximo de produção em simultâneo com um máximo do somatório dos tempos totais de espera, impele-nos a questionar a legitimidade dos motivos que levam a que os tempos de espera sejam tratados como um subproduto e não como uma actividade, cuja gestão poderia eventualmente trazer um funcionamento mais harmonioso e, conseqüentemente, mais satisfatório para todos⁵ os componentes do sistema.

A administração dos tempos de paragem poderia passar por uma distribuição das pausas de forma racional e ao longo do sistema, com uma filosofia diferente daquela que é assumida pelo *dispatching*⁶: método que pretende anular as paragens, de forma artificial, pois não evita que elas surjam, mas apenas as prevê com ligeira antecipação e, com isso, redistribui o tempo de duração de uma ou

⁵Para **todos**, e **de todo o tipo**: o tal “sistema natural tentando ser racional”, aludido anteriormente.

⁶O *dispatching* – que pode ser traduzido por algo como *expedição*, embora a denominação em português não seja utilizada em meio mineiro – é um sistema existente desde há muito, principalmente em minas a céu aberto, e que consiste num centro de operações que controla, supostamente em tempo real, as actividades dos equipamentos constituintes do sistema de carga e transporte. O objectivo passa por um controlo operacional apertado, principalmente com vista à actuação atempada na gestão das unidades de carga e de transporte. São sistemas usualmente implementados em frotas de grandes dimensões – que não é o caso no presente estudo – e que funcionam bem em termos de gestão corrente, mas que se mostram menos flexíveis no caso de interrupções não previstas ou de paragens temporárias e parciais da frota.

mais actividades. Se, por exemplo, um sistema de *dispatching* prevê que uma determinada unidade transportadora que se desloca para o local de carga vai ter que integrar uma fila de espera quando lá chegar, pode ser dada uma instrução ao manobrador para que este abrande a marcha, com vista a retardar a chegada e, eventualmente, evitar que se forme fila de espera. Ora, este tipo de procedimento anula a pausa, mas não actua no mecanismo que a origina; isto é: a pausa é criada e morta à nascença, mas com isso apenas se consegue, por um lado camuflar a sua existência, e por outro reduzir a produtividade do equipamento: se o camião abrande a marcha, significa que trabalha durante mais tempo, embora não produza mais.

Pelo contrário, se fosse possível prever e quantificar a totalidade dos tempos de paragem ao longo de um relevo, seria um exercício interessante tentar distribuí-los ao longo quer dos diferentes componentes do sistema, quer do tempo de duração do relevo, por forma a dosear esforços e descansos de máquinas e operários.

Sob um estrito ponto de vista da maximização da produção, e num contexto laboral, percebe-se a indispensabilidade da existência de pausas, o que constitui uma conclusão encantadora.

4.2 Mobilidade das filas de espera

4.2.1 Uma hipótese

O programa *ALJP0302* simula um sistema de carga e transporte numa exploração mineira a céu aberto, na qual existem dois locais onde se podem formar filas de espera: a zona de carga e a zona de descarga.

A experiência de observação *in loco* deste tipo de actividades permitiu-nos, por vezes, verificar a existência do seguinte fenómeno: durante um considerável período de tempo apenas se forma fila de espera num destes locais, enquanto que no outro ponto as unidades transportadoras cumprem de imediato a tarefa prevista à medida que vão chegando. Isto pode passar-se durante horas, até que,

de repente, há uma transferência da fila de espera entre estes dois locais; isto é: o local permanentemente liberto de fila de espera é onde esta se passa de então em diante a formar, enquanto que o local oposto – onde havia as esperas das unidades transportadoras – passa a estar livre para receber e de imediato despachar os camiões.

Tendo presente o episódio que acaba de ser relatado, atente-se no seguinte: cada ponto representado nos gráficos das figuras 4.1 a 4.6, representa a média dos relevos simulados (num dos cenários construídos, um ponto representa mesmo a média de dois milhões de valores). Ao trabalhar-se com apenas uma das medidas de tendência central, pode obter-se um valor que não seja representativo do fenómeno em estudo.

Se, por hipótese, o fenómeno da deslocação das filas de espera, acima descrito, acontecesse; uma representação gráfica representativa, por exemplo, do *somatório dos tempos de espera na fila do britador (stfb) vs o somatório dos tempos de espera na fila da carga (stfp)*, contendo, não a média relativa a 2000000 valores, mas sim a totalidade desses dois milhões de dados, deveria dar duas nuvens de pontos (cada uma relativa a um local da fila de espera). Situação em que o valor da média se encontraria fora de qualquer uma das nuvens, não sendo, por esse facto, representativo, antes enganador⁷.

4.2.2 Uma dinâmica não-linear

O nosso conhecimento de que o fenómeno que acaba de ser sucintamente descrito é uma realidade já por vezes observada na prática, aliado ao facto de o presente estudo se centrar num tipo de sistema de características comportamentais marcadamente *não-lineares*, acabou por justificar mais uma inflexão nos trabalhos exploratórios do nosso modelo.

⁷A verificar-se um cenário como o que acaba de ser descrito, uma sub-hipótese levaria a que se averiguasse se nalgum dos trabalhos precedentes – Miranda [Miranda, 1986] e Leite [Leite, 1998] – e mesmo nalguns dos cenários simulados no presente documento as observações teriam sido relativas a apenas uma das nuvens de pontos.

As noções de **linearidade** e de **não-linearidade**, sendo fundamentais para a fundamentação desta nova incursão, podem, de uma forma bastante simples (não necessariamente simplista!) ser caracterizadas através do comportamento de um sistema em termos de estímulo vs resposta: em consequência da indução de um determinado estímulo regista-se inevitavelmente uma resposta. Se esse estímulo for mensurável, e se for possível induzir novo estímulo, de características semelhantes mas de intensidade diferente, pode obter-se dois tipos de resposta: ou proporcional à que se obteve na fase inicial, ou não proporcional. No primeiro caso o comportamento do sistema (ou, pelo menos, da gama de impulsos testada) é *linear*, enquanto que no segundo é *não-linear*.

Um sistema não-linear é, meramente, um sistema cujas equações de evolução ao longo do tempo são não-lineares; isto é, as variáveis dinâmicas que descrevem as propriedades do sistema, figuram nas equações numa forma não-linear. A este tipo de sistemas – por vezes bastante simples e com poucos graus de liberdade – estão, muitas vezes, associados comportamentos cuja aparente complexidade não se compadece com uma descrição satisfatória do modo de funcionamento dos mesmos.

Ao estudo do comportamento dinâmico; isto é, ao longo do tempo, de um sistema que, como o de carga e transporte, é de características não-lineares, dá-se o nome de **dinâmica não-linear**. A importância dos sistemas não-lineares reside no facto de, por vezes, uma pequena alteração – qualitativa ou quantitativa – num parâmetro, poder dar origem a uma mudança súbita e radical no comportamento do sistema.

A *teoria da dinâmica não-linear* pretende descrever e classificar o comportamento complexo deste tipo de sistemas. Quando se trata de um comportamento aparentemente aleatório, aperiódico e/ou imbuído de ruído exterior é, por vezes com alguma ligeireza (quiçá mesmo ao longo do presente trabalho), classificado como **caótico**. A respectiva *teoria do caos*⁸, pretende ajudar a “ver” a ordem e a

⁸O caos, enquanto teoria, apenas começou a ser cabalmente desenvolvido a partir do momento

universalidade que estão na base de toda esta complexidade.

Num sistema dinâmico, o caos aparece quando dois estados inicialmente muito próximos um do outro divergem de tal forma que o seu comportamento se torna imprevisível. O facto de não ser possível prever, não significa que não exista regularidade no comportamento do sistema; simplesmente ela escapa ao nosso controlo.

A importância crucial do caos está no facto de fornecer uma explicação alternativa para esta aparente aleatoriedade: que nem depende de ruído nem de complexidade. O comportamento caótico aparece em sistemas que são na sua essência livres de ruído e que são relativamente simples: com apenas alguns graus de liberdade.

4.2.3 Atractores regionais

Tendo como base de partida a hipótese agora levantada, deu-se início a nova fase de exploração do modelo. Uma vez mais se procedeu às necessárias alterações no programa de simulação, com vista a obter a totalidade dos dados resultantes de uma qualquer simulação, em vez dum valor médio. O programa *ALJP0302* cedeu lugar ao *ALJP0309LZ*, que passou a criar um ficheiro para o qual debitava *outputs* após cada relevo.

em que Edward Lorenz ao explorar o seu modelo informático de previsão meteorológica se deparou com uma descoberta inesperada e de interpretação verdadeiramente complexa, que viria então a lançar as bases dessa nova ciência: a teoria do caos. O seu modelo trabalhava com valores até à sexta casa decimal, embora a impressora apenas escrevesse os *outputs* com três casas decimais. Quando Lorenz pretendeu repetir as simulações relativas a um determinado período de tempo, fez-se valer dos dados que tinha impressos e introduziu-os no computador. Essa, aparentemente ligeira, alteração bastou para que o resultado da repetição da simulação fosse absolutamente distinto daquele que tinha obtido anteriormente. Provava, desta forma, que a mais ténue variação das condições iniciais pode originar comportamentos absolutamente diferenciados a longo prazo. Daqui resultou o conceito de **dependência sensível das condições iniciais**, que pretende traduzir a ideia de como o micro influencia o macro; isto é: de como pequenas alterações podem causar mudanças em larga escala, admitindo-se que uma sequência de acontecimentos pode ter um ponto crítico capaz de ampliar as pequenas alterações, sendo que a multiplicação de erros e incertezas segue uma rápida cadeia de expansão dos factores de perturbação. Este conceito ficou celebrizado como *efeito borboleta*, devido ao exemplo dado por Lorenz de que o simples bater de asas de uma borboleta poderia estar na origem de um tornado numa outra parte do globo.

Na abordagem anterior, ao simularem-se valores do intervalo $3,000\% < cv < 3,500\%$ com um passo de $0,00025$, obtivemos 21 pontos. Nesta fase seleccionou-se aquele ponto que forneceu maior amplitude nos valores conjuntos de P e p no que se refere a uma análise comparativa dos quatro cenários (1000, 32000, 100000 e 2000000 relevos). Esse ponto é o que corresponde a $cv = 3,200\%$.

Tempos de espera

A nuvem de pontos representada no gráfico da figura 4.7, que se refere aos dois milhões de valores, não permite confirmar a hipótese levantada. Na realidade, apenas existe uma nuvem de pontos, quando a expectativa era a da existência de duas nuvens, correspondendo cada uma delas e respectivamente a uma maior preponderância dos tempos de espera em cada uma das filas – carga e descarga.

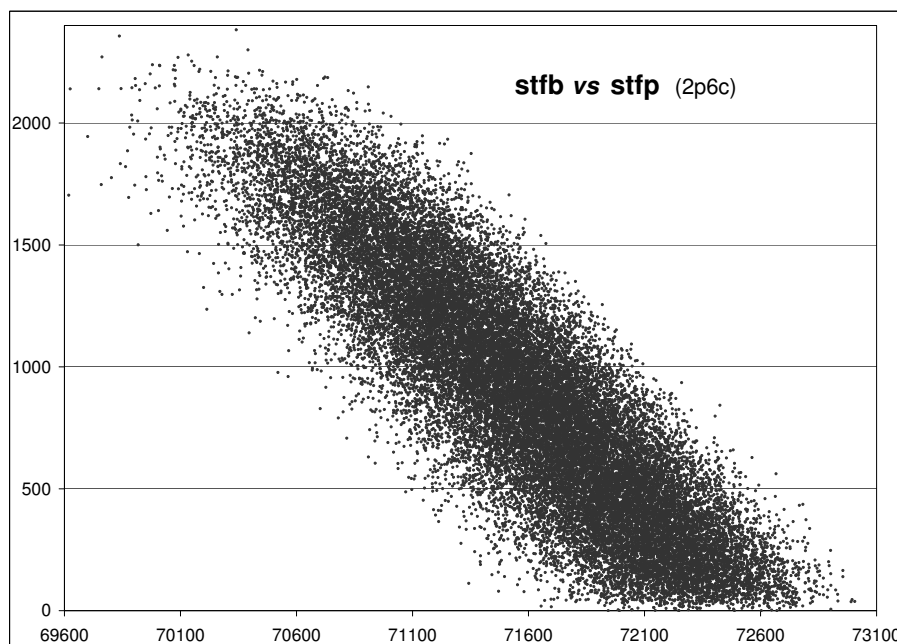


Figura 4.7: Gráfico demonstrativo do comportamento do par $(stfb, stfp)$, para $cv=3,200\%$, relativo a 2000000 relevos.

A expectativa que nos guiou foi a da existência de um *atractor estranho* com um comportamento semelhante ao de Lorenz⁹.

No presente caso, a construção da nuvem de pontos revela que não existe um atractor pontual, não obstante a possibilidade de se poder falar num outro tipo de atractor: de características zonais ou regionais.

O gráfico da figura 4.7 é apenas um de entre os quatro que foram elaborados, relativos a outros tantos cenários de simulação: com 1000, 32000, 64000 e 2000000 de valores respectivamente. Os valores obtidos em cada um dos diferentes casos foram de tal modo comparáveis que os quatro gráficos eram sobreponíveis. Apenas aumentava, obviamente, a densidade de pontos à medida que se ia transitando gradualmente do cenário composto por 1000 repetições para aquele que compreendeu 2000000 de relevos; sendo que os limites da nuvem não sofriam alteração.

De assinalar, ainda, que estamos cientes de que, na busca de um atractor, as representações mais elucidativas são os gráficos de trajectórias. Eles foram por nós elaborados, mas optou-se por não os apresentar no presente documento, devido a dois motivos, a saber: um primeiro relacionado com a trajectória em si, que não aparentava seguir nenhuma regra; e um segundo, e decisivo, motivo foi o de que o resultado final era uma mancha imperceptível, de consequente leitura inconclusiva. Apenas a observação do gráfico a ser construído passo a passo nos permitiu verificar o modo como ia sendo delineada a trajectória, e concluir da não existência de um atractor pontual, mas de uma eventual *bacia de atracção*. A ser assim; isto é: a não existir um atractor pontual, mas sim um atractor regional, um

⁹Quando, em 1961, Lorenz se deparou com os resultados anteriormente descritos, conseguiu reduzir o seu modelo a apenas três equações diferenciais. Com os resultados obtidos produziu gráficos tridimensionais e pôde assistir ao delinear de trajectórias que se comportavam de um modo estranho, pois nunca acabavam num ponto fixo, nem num ciclo limite estável, sem nunca, todavia, divergirem para o infinito. A curva resultante era uma dupla espiral no espaço, que não tinha comportamento cíclico – não passava, pois, duas vezes pelo mesmo ponto – mas que, apesar disso, estava restringida ao interior de uma superfície fechada. Devido a este comportamento – estranho, este conjunto de pontos definidor da trajectória foi baptizado de **atractor estranho de Lorenz**.

gráfico de trajectórias não faz sentido, pelo que a opção pela sua não apresentação fica, em último caso, justificada à posteriori.

Esta possibilidade – da existência de uma bacia de atracção – faz-nos regressar ao início do presente capítulo, na medida em que, de acordo com Mandelbrot, a curva que delimita uma bacia da atracção é um fractal. E, de facto, tudo se encaixa. Senão vejamos: o conceito de dinâmico encerra em si as noções de não constante e não periódico (tal como o atractor de Lorenz, mas também tal como a nossa nuvem), o que permite afirmar que a teoria do caos se ocupa do estudo de sistemas dinâmicos não lineares. Ora, os limites da nuvem de pontos apresentada na fig.4.7 mantém-se inalterados, quer utilizemos 1000, quer utilizemos 2000000 de pontos (relevos); isto é: uma viagem ao interior da nuvem não apresenta qualquer novidade, à óbvia excepção da diferença de densidade, pelo que, com algumas cautelas, porém vou afirmá-lo: a sua geometria, tal como o seu contorno, tem características fractais.

Para além das características fractais exibidas pela nuvem, ela apresenta, simultaneamente, as características caóticas do comportamento imprevisível (traduzido na impossibilidade de se prever a trajectória), e regularidade (na medida em que se desenvolve dentro de determinadas fronteiras, nunca as ultrapassando).

A regularidade traduzida pela invariante fronteira da nuvem de pontos, indica que estamos a lidar com uma grandeza que não ultrapassa determinados limites dentro do espaço-fase. Portanto, e uma vez que a simulação por nós efectuada assenta numa lógica de programação de *Monte Carlo* – não havendo formulação mecânica – significa que, em termos conceptuais, não há dissipação¹⁰. Estamos, pois, perante um sistema de características conservativas que nos sugere haver uma equação diferencial estocástica que defina a regra do invariante.

¹⁰Considera-se, de forma muito genérica, que um sistema é conservativo quando não existe dissipação de energia; isto é: quando a energia mecânica (determinada pelo somatório das diferentes energias presentes) se mantém constante ao longo de todo o processo. A *característica da reversibilidade*, própria dos sistemas conservativos, permite que os acréscimos e decréscimos das diferentes energias se compensem constantemente, por forma a que a soma das diferentes energias seja invariante, ou igual em qualquer instante.

Produção

Face à possibilidade de estarmos perante um fenómeno caótico de manifesta estrutura fractal, impunha-se que trabalhássemos os restantes dados disponíveis, nomeadamente que conjugássemos o comportamento conjunto de *produção* e dos *tempos de espera* (nas suas diversas vertentes).

Quanto à variável *produção*, quando conjugada com a variável *tempo total de espera* (ou mesmo com qualquer das variáveis *stfb* e *stfp*), cujo comportamento pode ser analisado na fig. 4.8 (e, respectivamente, nas figs. 4.9 e 4.10), a sua interpretação poderá ser feita à luz da capacidade de carga de cada unidade transportadora. A quase totalidade dos valores situa-se na moda, ou a distâncias múltiplas de 6, sendo que $6m^3$ é precisamente a capacidade da caixa de carga de um camião. Os poucos pontos que se situam fora desta regra relacionar-se-ão, eventualmente, com problemas relativos à *disciplina de fecho do relevo*. Importa assinalar que o circuito do material desmontado que se inicia com a carga não termina quando é despejado na tolva, mas sim quando desta é transferido, através dum alimentador, para o britador primário. Resulta que, quando é dado por terminado um relevo, apesar de se esperar que tenham sido movimentadas quantidades múltiplas de $6m^3$, poderá eventualmente haver material retido na tolva, que justifique o aparecimento dos “pontos soltos” nos gráficos das figuras 4.8 a 4.10. Em qualquer dos gráficos em questão, e mesmo em outros cenários que foram simulados posteriormente (com restrições à capacidade da tolva), a quantidade desses pontos nunca excede, todavia, 0,1% da totalidade.

Sob o ponto de vista matemático, a explicação para o aparecimento deste tipo de pontos poderá passar pelo facto de o algoritmo conjugar variáveis contínuas, como sejam os tempos e as produções, com variáveis discretas, como sejam as composições das frotas.

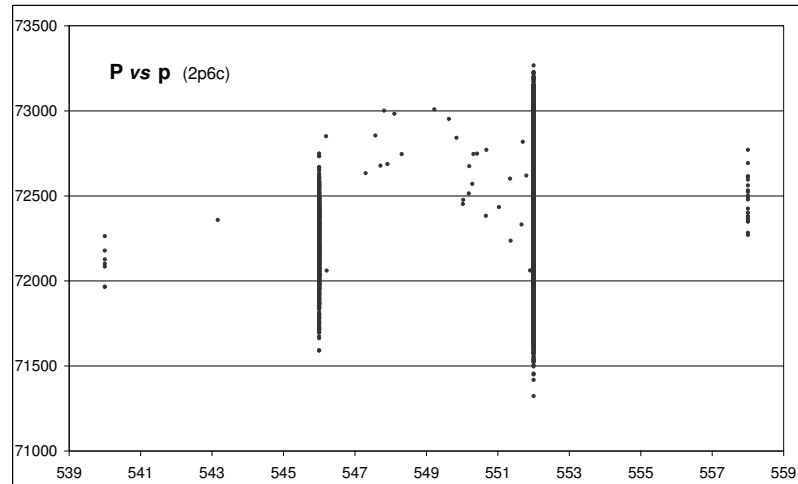


Figura 4.8: Gráfico demonstrativo do comportamento do par (P, p) , para $cv=3,200\%$, relativo a 2000000 relevos.

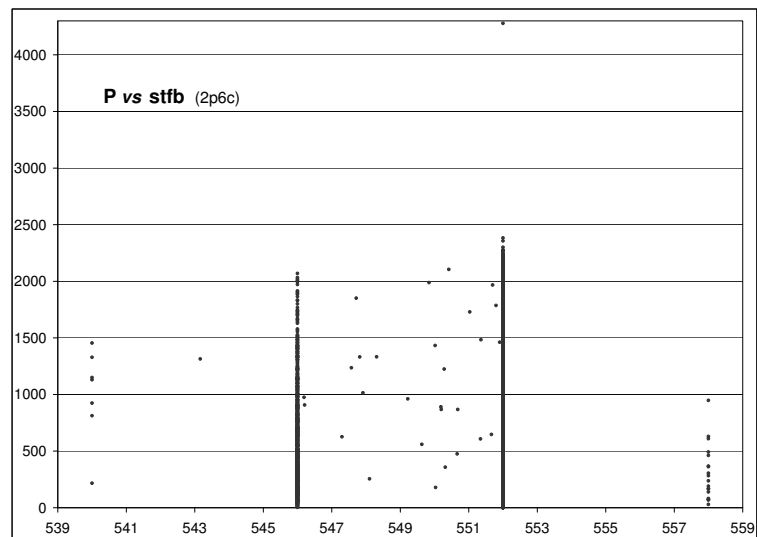


Figura 4.9: Gráfico demonstrativo do comportamento do par $(P, stfb)$, para $cv=3,200\%$, relativo a 2000000 relevos.

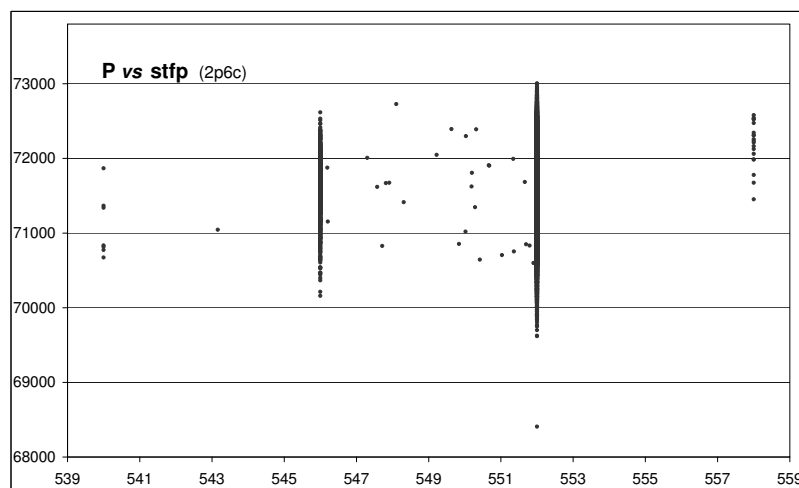


Figura 4.10: Gráfico demonstrativo do comportamento do par $(P, stfp)$, para $cv=3,200\%$, relativo a 2000000 relevos.

Trajectórias tridimensionais

Temos já vindo a falar de atractores, não obstante ainda só termos apresentado gráficos bidimensionais. Quando efectuados gráficos tridimensionais, dos quais se destaca o da fig. 4.11, que compreende as variáveis *produção*, *somatório dos tempos de espera na fila do britador* e *somatório dos tempos de espera na fila da carga*, o resultado volta a ser animador.

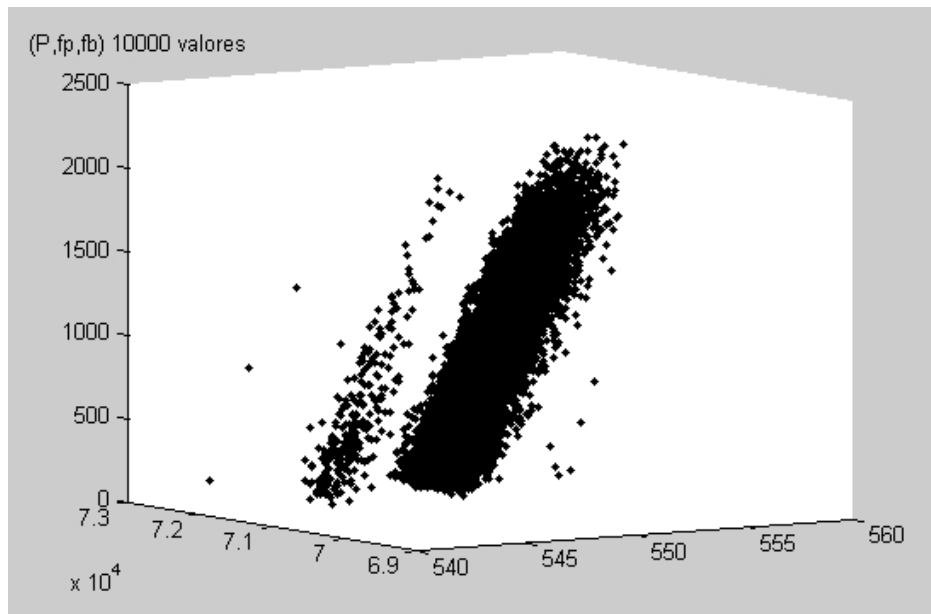


Figura 4.11: Gráfico demonstrativo do comportamento do trio $(P, stfp, stfb)$, para $cv=3,200\%$, relativo a 2000000 relevos.

A existência de duas nuvens de pontos não indica a presença de um atrator pontual. No entanto, mais uma vez, aponta para a existência de regiões de atracção. A nuvem de maior dimensão contém cerca de 97,20% da totalidade dos pontos e a de menor dimensão cerca de 2,78%, ficando os restantes 0,02% para ser preenchidos pelos pontos soltos. Também neste caso o acompanhamento do delinear do gráfico não traduzia uma trajectória regular, não parecendo existir qualquer regra perceptível definidora da sequência com que iam sendo implantados; antes mostrava a mesma a saltar de forma muito irregular de uma para outra

nuvem. Esse motivo, aliado ao facto de o resultado final se traduzir numa mancha imperceptível e de consequente leitura impossível, forçou-nos, tal como anteriormente, a apresentar um gráfico de pontos e não um gráfico de trajectórias.

A noção de um universo determinista e perfeitamente previsível, que fundamentava a explicação da imprevisibilidade de determinados fenómenos num problema de falta de equações correctas para resolver o problema, tem vindo desde há mais de um século a ser rebatida.

Um contributo fundamental foi fornecido por Poincaré¹¹ quando, em 1880, se ocupou do *problema dos 3 corpos*. Até aí, o pensamento dominante e que tinha sido especialmente personificado por Laplace¹² era de que as equações de Newton¹³ poderiam ser aplicadas para determinar a posição, a velocidade e a aceleração de qualquer corpo, em qualquer instante – passado ou futuro – bastando, para isso, conhecer o seu estado em um qualquer instante.

Os cálculos necessários para determinar as trajectórias de dois corpos sob acção mútua das suas massas haviam sido já demonstrados por Newton, e pensava-se que os problemas mais complexos – com maior número de corpos – seriam apenas desenvolvimentos deste. Todavia, esta suposição foi abandonada quando se tentou prever o comportamento de três corpos – *o problema dos três corpos* – interagindo pela gravidade. A prática demonstrou a impossibilidade de se obter uma equação tradutora das posições futuras dos corpos, não obstante o conhecimento da dinâmica aplicada a cada corpo individualmente. Esta aparente anomalia – enquanto que com dois corpos o sistema é periódico e previsível, tornando-se muito

¹¹Henri Poincaré - matemático francês (1854-1912). Investigador de princípios gerais e por muitos apontado como um unificador por ser considerado “o último dos tradicionalistas e o primeiro dos modernos”.

¹²Pierre-Simon Laplace - matemático, físico e astrónomo francês (1749-1827). Eventualmente mais conhecido pelo seu contributo para a teoria das probabilidades – que para ele não era mais do que o senso comum expresso em números – foi um estudioso da astronomia que se debateu, entre outras coisas, com a hipótese nebular da origem do sistema solar.

¹³Isaac Newton - matemático, físico e astrónomo inglês (1642-1727). Estabeleceu o princípio da gravidade, eliminando, desta forma, a dependência da acção divina e influenciando profundamente o pensamento filosófico do séc. XVIII. Tem, como obra de referência *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (Princípios Matemáticos da Filosofia Natural).

mais delicado do que seria expectável pela “simples” adição de mais um corpo – conferiu fama a este problema.

Ao debruçar-se sob o *problema newtoniano dos três corpos* – que é o problema dos n corpos com $n = 3$ – Poincaré verificou que as trajectórias não apresentavam qualquer tipo de regularidade, pelo menos de cariz periódico. A sua abordagem ao problema, que esteve na base da génese de um novo ramo da matemática – a topologia – passou pela análise geométrica. Ao trabalhar no *espaço-fase* deparou-se – tal como no presente trabalho – com a dificuldade em obter traçados das trajectórias que fossem “legíveis”. Desenvolveu, para isso, uma nova técnica que consistia em analisar apenas uma secção plana ortogonal da órbita. A análise deste tipo de representação – conhecida como *Secção de Poincaré* – permite extrair informações acerca da órbita, destacando-se a possibilidade de determinar se ela é ou não periódica.

No trabalho agora apresentado, e pelos motivos que ficaram já expostos, sentimos igualmente a necessidade de fazer representações bidimensionais, como forma de aclarar aquilo que se passava com o comportamento conjunto de três variáveis. Pensamos haver legitimidade para estabelecer algum paralelo entre estes gráficos e as secções de Poincaré¹⁴. Num caso e noutro, ao ser retirada uma dimensão, transforma-se uma trajectória numa nuvem de pontos: cada vez que a trajectória passa através dum plano marca um ponto

Uma vez mais o gráfico efectuado com 1000 ou com 2000000 valores não apresenta diferenças significativas, para além da evidente diferente densidade. Os limites da superfície, quer de cada uma das nuvens maiores, quer da totalidade da colecção de pontos ficam definidos com muito poucos dados. O comportamento é, sob esse prisma, semelhante ao anteriormente observado aquando da execução de gráficos bidimensionais, de características geométricas fractais, e de

¹⁴Poincaré notou, ainda, que as trajectórias são extremamente sensíveis às condições iniciais estabelecidas e que, conseqüentemente, qualquer imprecisão no estabelecimento dessas condições iniciais resulta num comportamento de tal modo divergente que inviabiliza qualquer previsão. Poincaré mostrou, sem que o tivesse assimilado, o *caos determinístico*.

comportamento algo caótico, porquanto imprevisível, porém regular (não excede determinados limites).

Capítulo 5

Actividades dominantes

*“...muitas vezes achamos que já se pode afirmar
que não vale a pena esperar conclusões
só porque resolvemos parar no meio do caminho
que nos levaria a elas”*

José Saramago

Neste capítulo averiguamos a possibilidade de haver actividades que condicionassem o desempenho das restantes e, conseqüentemente, do próprio sistema. Antevia-se já a necessidade de disseminar as buscas por outros possíveis trilhos antes de se poder afirmar que o modelo servia para atestar a impossibilidade de previsão deste tipo de sistemas quando a funcionar em gamas estreitas.

5.1 Tarefas críticas

5.1.1 A frota 2p6c

Num trabalho desta natureza, são múltiplas as possibilidades de ramificação e dispersão relativamente a um rumo que vai sendo delineado, podendo correr-se o risco de – devido a constringências de tempo – se desperdiçar a possibilidade de análise faseada e apoiada em resultados progressivamente obtidos. Desta forma, a presente abordagem teve, mais uma vez, como base a frota 2p6c e o respectivo gráfico da fig. 3.19, por considerarmos que o mesmo encerrava muita informação útil que não tinha ainda sido processada e que, por conseguinte, merecia um olhar atento.

A questão passava agora por averiguar se alguma das cinco actividades – *manobra de arrumação da pá*, *manobra de unitária da pá*, *viagem de ida do camião*, *viagem de regresso do camião* e *manobra de descarga do camião* – teria um papel preponderante, no sentido de influenciar de forma decisiva os resultados obtidos no final de cada simulação. Isto é: até aqui tínhamos feito variar as condições iniciais actuando em simultâneo nas cinco actividades. A proposta, para esta etapa, passava por fazer variar, de forma faseada, as condições impostas a cada uma das actividades, fixando as das outras quatro, com o propósito de averiguar se seriam registadas diferenças significativas nos resultados finais de cada um dos diferentes cenários.

Procedimentos

Continuamos a testar alterações no *coeficiente de variação*, por acção no *desvio padrão*, mantendo fixa a *média*. O intervalo de variação de *cv* seleccionado foi o compreendido entre 2,5% e 5%¹, com passos de 0,5%, o que se reflectiu em 6 diferentes simulações por cenário estabelecido. Foi estabelecido um máximo de 500000 relevos para que cada simulação estabilizasse dentro de um intervalo de $cc = 0,01$.

A grande diferença relativamente à simulação que deu origem ao gráfico da fig. 3.19 foi que as cinco diferentes actividades (manobra de **arrumação** da pá, **manobra unitária** da pá, viagem de **ida** do camião, viagem de **volta** do camião e manobra de **descarga** do camião) passaram a ter distintos valores de *cv* em cada simulação. Na realidade, inicialmente estabeleceu-se aquela que foi definida como *série de referência*, na qual o valor de *desvio padrão* de cada uma das cinco actividades, em cada etapa de simulação foi sempre relativo a um mesmo valor de *coeficiente de variação*.

Após o estabelecimento e simulação dessa série de referência montamos cinco diferentes cenários – relativos à variação das condições iniciais de outras tantas actividades – sendo que, em cada um deles se fixou o valor do *desvio padrão* (relativo a um *coeficiente de variação* de 5%) para quatro das operações, apenas se fazendo variar o valor do *desvio padrão* numa quinta operação. Assim se obtiveram seis diferentes séries:

- a série *de referência*
- a série **arrumação** (pá)
- a série **manobra** (pá)

¹O gráfico da figura 3.19 compreende uma gama de *coeficientes de variação* entre 0,000001% e 5%; todavia, o troço “mais determinístico” apresenta características muito distintas – *P* mantém-se constante – do restante traçado, pelo que uma simulação que compreendesse a totalidade dos valores de *cv* compreendidos entre 0,000001% e 5% poderia dificultar a leitura. Acrescem, ainda, as habituais constricções de tempo.

- a série *ida* (camião)
- a série *volta* (camião)
- a série *descarga* (camião)

O objectivo de averiguar se alguma das actividades teria um papel dominante sobre as outras pareceu começar a fazer algum sentido após a construção do gráfico apresentado na fig. 5.1.

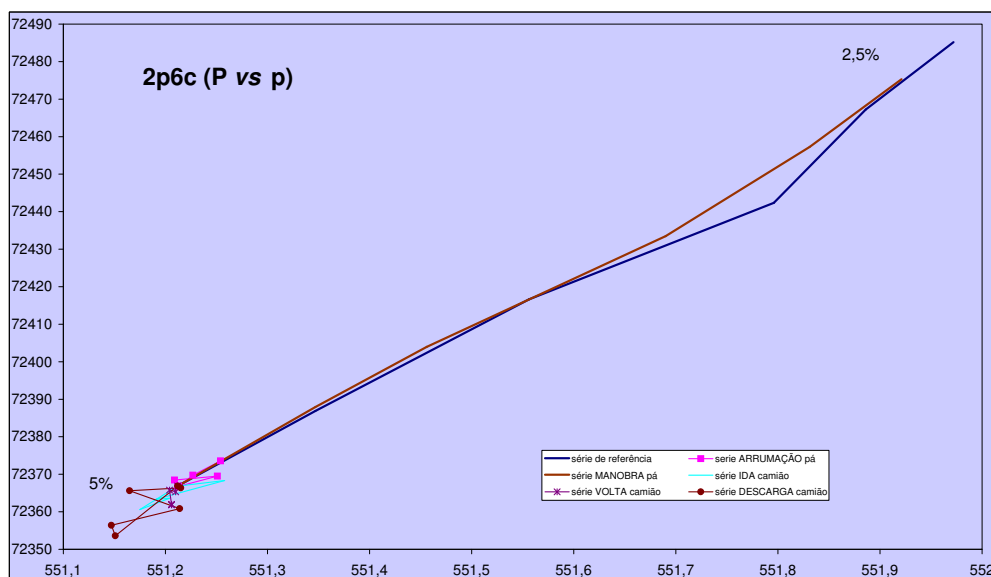


Figura 5.1: Gráfico comparativo do comportamento do par (P, p) , em função do pendor atribuído a cada uma das cinco diferentes actividades.

A operação *manobra da pá* parece condicionar a dinâmica do processo, na medida em que tanto a **dimensão** como o **traçado** do gráfico da respectiva série se apresentam como praticamente coincidentes com o da *série de referência*. A

consulta dos dados permite concluir que os *tempos totais de espera dos camiões na zona de carga* representam cerca de 99% dos *tempos totais de paragem* do sistema. Ora, os camiões esperam na zona de carga quando a totalidade das pás-carregadoras está ocupada, por uma de duas razões: ou a carregar, ou a efectuar a *manobra unitária da pá*; o que transforma a *operação de manobra unitária da pá* na tarefa crítica do sistema; isto é: a tarefa responsável pelas interrupções ao normal funcionamento do sistema.

Apesar da frota 2p6c se situar numa *zona de crista* de *produções e produtividades* no algoritmo de Leite [Leite, 1998], não impede de, nas presentes condições, e em face do que acaba de ser concluído relativamente à *operação de manobra unitária da pá*, se levantar a dúvida relativamente ao facto de esta configuração ser eventualmente deficitária em unidades carregadoras.

Pareceu-nos óbvio que o caminho teria que passar, necessariamente, por repetir as presentes simulações, agora com uma frota com uma diferente relação unidade carregadora/unidade transportadora. Passou-se à simulação da frota 4p6c, cujos resultados – resumidos no gráfico da figura 5.2 – não parecem confirmar o predomínio da *operação de manobra unitária da pá*, nem de qualquer outra. Pelo contrário, o que parece é que existe um equilíbrio no pendor de cada uma das actividades, provavelmente devido precisamente ao facto de haver excesso de pás-carregadoras relativamente ao número de camiões a carregar. Supôs-se, pois, que a haver predomínio de uma das actividades relativas às pás só poderia acontecer numa frota deficitária em unidades carregadoras.

Numa tentativa de ajudar a confirmar esta última suspeita, optou-se por averiguar o comportamento da frota 5p6c, por se tratar de uma configuração com ainda maior equilíbrio entre o número de pás e camiões (claramente com excesso de pás). Todavia, o gráfico da figura 5.3 aponta precisamente no sentido duma harmonia no pendor das cinco operações.

Uma análise menos cuidada dos resultados obtidos com a simulação da frota 5p6c (constantes do gráfico da fig. 5.3) poderia induzir-nos a considerar que existe

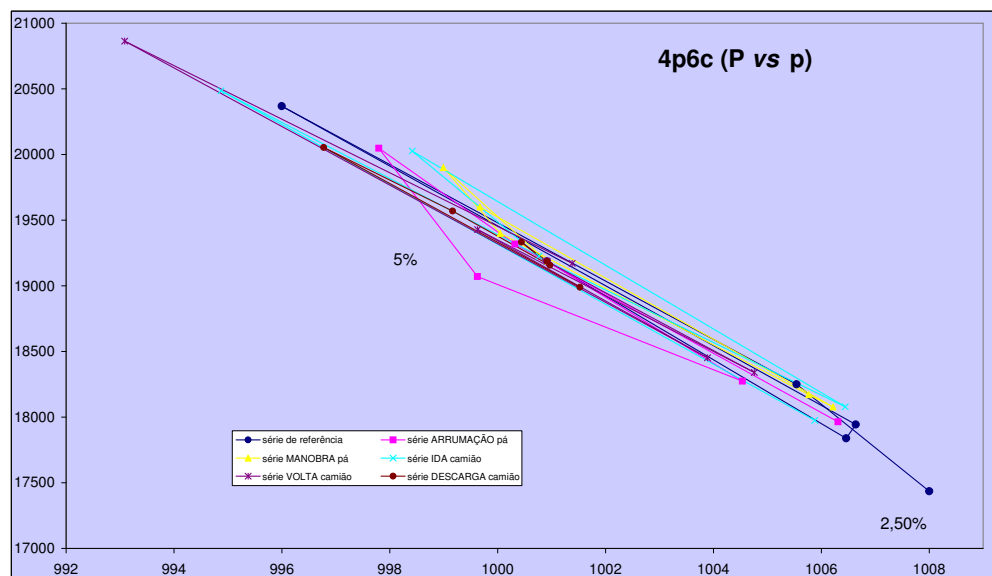


Figura 5.2: Gráfico comparativo do comportamento do par (P, p) , em função do pendor atribuído a cada uma das cinco diferentes actividades (frota 5p6c).

algo de incongruente nos mesmos; senão vejamos: não deixa de ser curioso que, havendo pás em excesso, o valor total da espera das mesmas não desempenhe, agora, papel de *tarefa crítica*.

Na realidade, e sob o ponto de vista de funcionamento do sistema, é preferível ter pás do que camiões à espera, pois destes depende todo o sistema, enquanto que pás paradas significa precisamente que não estão, no momento, a ser necessárias. A produção não é, pois, afectada pela paragem de pás (por falta de camiões para carregar), pois todo o sistema de transporte continua a abastecer a tolva. Por outro lado, a existência de espera por parte dos camiões traduz-se numa interrupção no sistema de transportes e, conseqüentemente, num abaixamento da produção por falta de movimentação da matéria prima para jusante do sistema de carga e

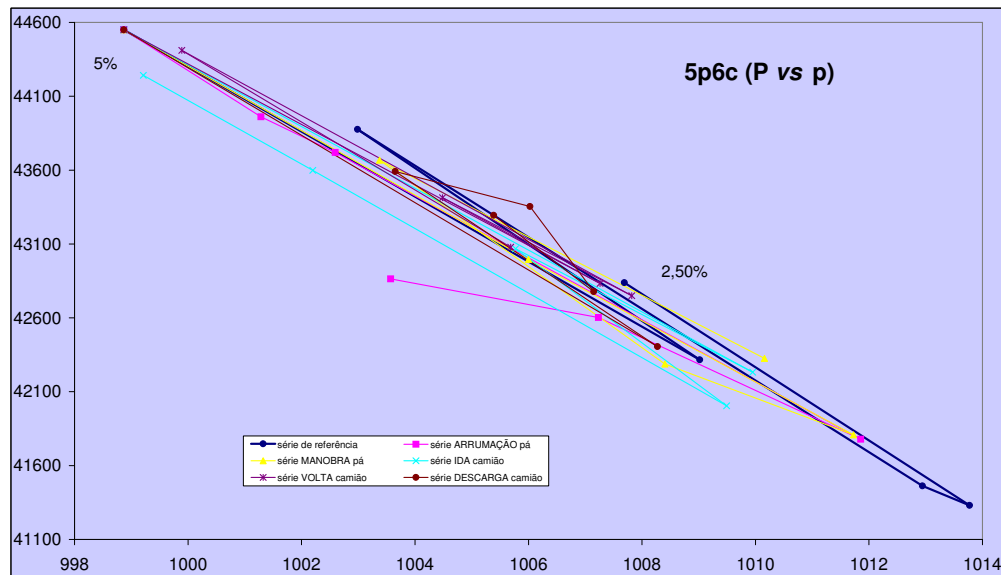


Figura 5.3: Gráfico comparativo do comportamento do par (P, p) , em função do pendor atribuído a cada uma das cinco diferentes actividades (frota 5p6c).

transporte.

Sob o estrito ponto de vista da **produção**, pode, sem hesitação afirmar-se que: a haver sobredimensionamento de frota, é preferível que seja por parte das unidades carregadoras.

5.1.2 Perseguindo uma hipótese

Embora cientes da morosidade do processo, a possibilidade de haver uma tarefa crítica em relação ao desempenho do sistema condicionou a decisão de alargar a investigação desta hipótese a um maior número de frotas.

A vontade de simular 144 frotas – todas as combinações de 1 a 12 pás e de 1

a 12 camiões² – obrigou a algumas restrições. Assim, apenas se simulou dois cenários por série e por frota: um relativo a $cv = 2,5\%$ e outro relativo a $cv = 5\%$. Também o tipo de série foi restringido; apenas se construindo, para cada frota, a *série de referência* e a *série manobra unitária da pá*. A primeira pelo que representa e a segunda por corresponder, na altura, à hipótese levantada.

Ocorreu-nos, obviamente, que em determinadas frotas pudesse eventualmente existir uma tarefa crítica que não essa. Todavia, e tendo sempre o factor *tempo* presente – havíamos já simulado exaustivamente as frotas *4p6c* e *5p6c*, sem que tivéssemos vislumbrado qualquer vestígio da concretização dessa possibilidade – optamos por simular apenas a frota *2p6c*.

A aparente limitação de apenas se simular os extremos, não passou disso mesmo, uma vez que era e foi suficiente para revelar quer a **dimensão** quer a **tendência** da *série manobra unitária da pá* relativamente à *série de referência*.

Com base em alguns dos dados recolhidos após aquele processo de simulação, foram construídos 121 gráficos, dos quais exemplificamos aqui apenas os suficientes para suportar as conclusões inerentes à sua interpretação. Assim, nas figuras 5.4 e 5.5 exemplifica-se dois dos casos em que a actividade *manobra unitária da pá* poderá, eventualmente, desempenhar um papel de *tarefa crítica*; enquanto que nas figuras 5.6 e 5.7 são apresentados dois gráficos exemplificativos da situação oposta.

Uma interpretação exaustiva dos 121 gráficos permitiu retirar as seguintes conclusões: nas frotas em que existem duas pás carregadoras; isto é: de *2p2c* a *2p12c* a *manobra da pá* tem dimensão e traçado semelhantes aos da *série de referência*, sendo de realçar que nas frotas com número de camiões compreendido entre 6 e 12 (isto é: *2p6c* a *2p12c*), o traçado das duas séries (*manobra pá* e *referência*) é praticamente coincidente.

²Na realidade acabou por apenas se simular 121 frotas, dado que as configurações em que, para um dado tipo de máquina (carregadora ou transportadora) apenas existia uma unidade, foram abandonadas, na medida em que nunca estabilizavam abaixo do limite máximo imposto de 500000 relevos

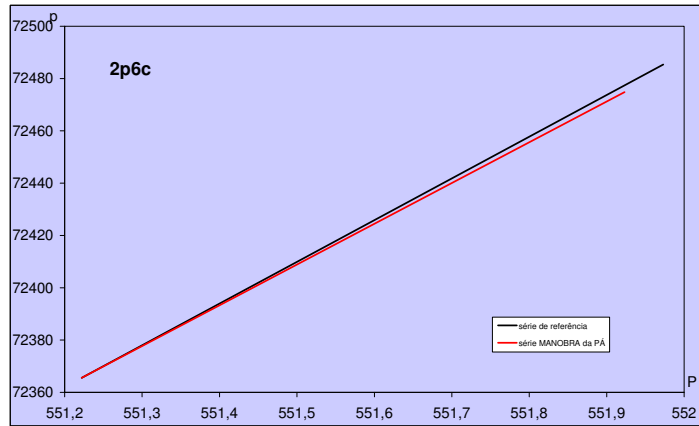


Figura 5.4: Exemplo de um gráfico representativo de uma frota – $2p6c$ – onde existe a possibilidade de a *manobra unitária da pá* assumir o papel de tarefa crítica (P em abscissa, p em ordenada).

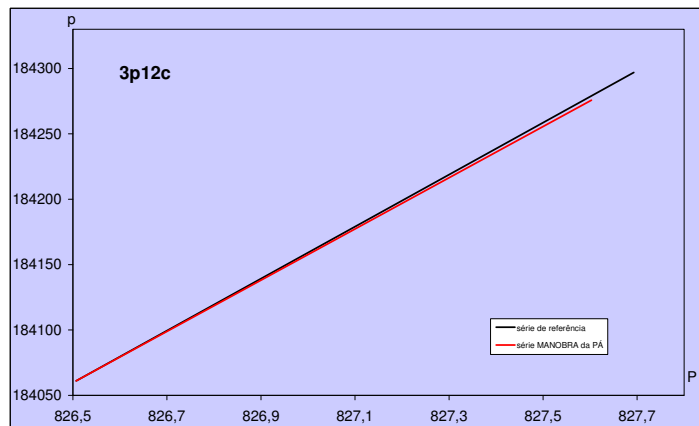


Figura 5.5: Exemplo de um gráfico representativo de uma frota – $3p12c$ – onde existe a possibilidade de a *manobra unitária da pá* assumir o papel de tarefa crítica (P em abscissa, p em ordenada).

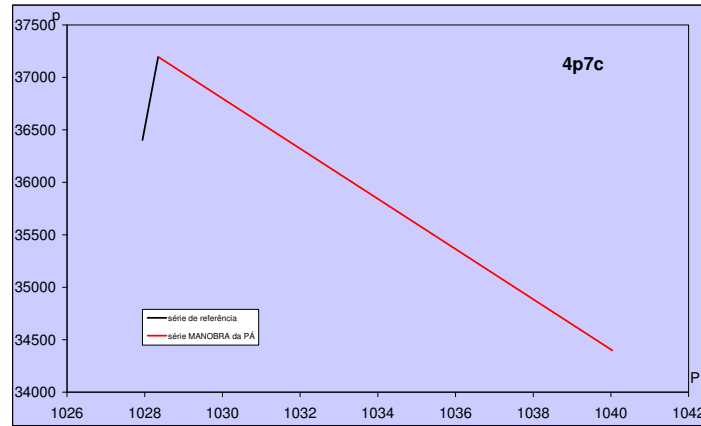


Figura 5.6: Exemplo de um gráfico representativo de uma frota – $4p7c$ – onde a possibilidade de a *manobra unitária da pá* assumir o papel de tarefa crítica não parece provável (P em abcissa, p em ordenada).

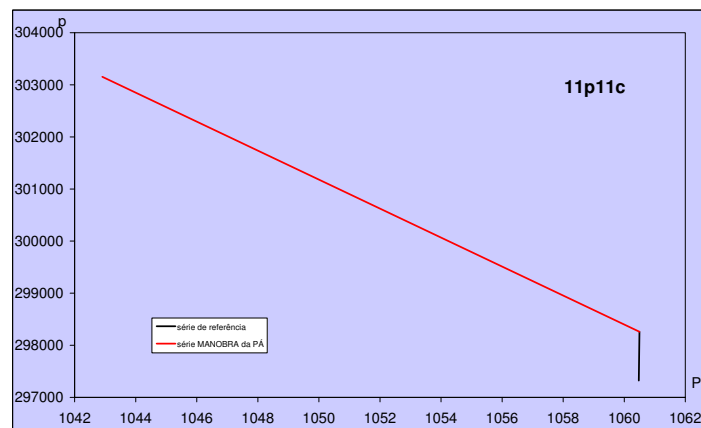


Figura 5.7: Exemplo de um gráfico representativo de uma frota – $11p11c$ – onde a possibilidade de a *manobra unitária da pá* assumir o papel de tarefa crítica não parece provável (P em abcissa, p em ordenada).

Nas configurações com três pás, apenas existe coincidência no traçado das duas séries em estudo nas frotas *3p5c* e *3p8c* a *3p12c*.

Nas restantes configurações apenas surgem casos pontuais em que o traçado das séries é quase coincidente: *6p11c*, *7p7c*, *7p12c*, *8p12c*, *10p12c*, *12p10c* e *12p11c*.

Acontece que, nenhuma das 20 frotas acabadas de referir – em que existe a possibilidade de a manobra da pá poder assumir contornos de principal actividade condicionadora do normal funcionamento do sistema – constitui uma frota óptima (excepção feita às frotas *3p5c* e *7p7c*). Isto é: a consulta da tabela 5.1, permite concluir que para qualquer dos casos, existe sempre uma configuração com menor número de máquinas que consegue igual produção.

	2 cam.	3 cam.	4 cam.	5 cam.	6 cam.	7 cam.	8 cam.	9 cam.	10 cam.	11 cam.	12 cam.
12 pás	351	525	699	871	1004	1066	1037	1059	1070	1075	1083
11 pás	351	528	698	870	1007	1056	1050	1064	1069	1061	1061
10 pás	351	525	700	869	1006	1062	1070	1059	<i>1083</i>	1040	1023
9 pás	351	525	700	868	1005	1066	<i>1075</i>	1070	1067	1030	1069
8 pás	351	525	700	870	1000	1052	<i>1069</i>	1050	1047	1068	1020
7 pás	351	525	700	870	<i>1007</i>	1066	1058	<i>1072</i>	1052	1064	1054
6 pás	351	525	700	870	1000	1056	1037	<i>1067</i>	1056	1055	1058
5 pás	351	525	700	870	1000	<i>1060</i>	1056	1055	1062	1053	1060
4 pás	351	525	700	<i>870</i>	<i>1000</i>	<i>1028</i>	<i>1044</i>	1035	1038	<i>1050</i>	1048
3 pás	351	525	699	819	827	827	827	827	827	827	827
2 pás	<i>351</i>	522	<i>551</i>	551	551	551	551	551	551	551	551

Tabela 5.1: Tabela tradutora da produção média de cada frota, para valores de *cv* compreendidos no intervalo [2,5%;5%]. Os valores em itálico representam frotas óptimas, enquanto que as células que possuem informação mais destacada (a negrito) representam frotas em que existe sobreposição dos gráficos *série de referência* e *série manobra unitária da pá*.

A opção seguinte passou por analisar com maior detalhe as configurações que constituem conjunto intercepção entre “frotas óptimas” e “frotas com *manobra da pá* como eventual *tarefa crítica*”, isto é: frotas *3p5c* e *7p7c*.

Os gráficos apresentados nas figuras 5.8 e 5.9 referem-se, respectivamente, às frotas *3p5c* e *7p7c* e apontam para conclusões distintas: enquanto que na frota *3p5c* – que é uma configuração dita óptima – a tarefa *manobra unitária da pá*

parece ser uma tarefa crítica, na frota 7p7c isso já não acontece.

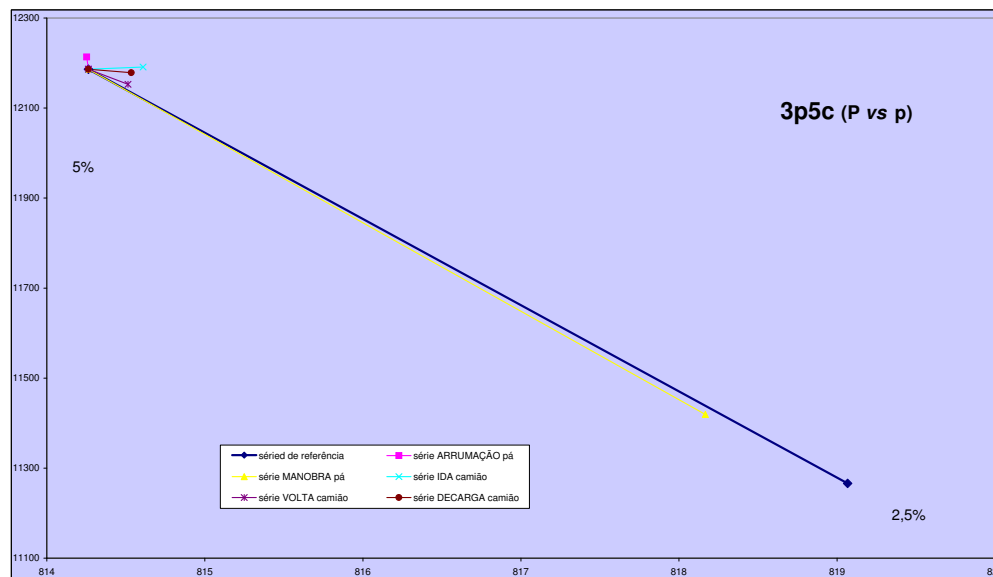


Figura 5.8: Gráfico comparativo do comportamento do par (P, p) , em função do pendente atribuído a cada uma das cinco diferentes actividades.

Ao recapitularmos muito brevemente a busca que acabava de ser realizada, concluíamos que a possibilidade de a *manobra unitária da pá* se constituir como tarefa crítica não estava afastada, porém, por um lado, uma vez mais nos deparamos com a inability para detectar uma relação padronizada entre as frotas onde esse “fenómeno” poderia, eventualmente, ter lugar; e por outro lado, as frotas onde isso acontece são configuração descompensadas; isto é, sobredimensionadas relativamente a unidades carregadoras ou a unidades transportadoras.

Os caminhos não estavam, todavia, esgotados, pelo que se optou por realizar mapas de iso-produções e iso-produtividades³, relativos às 121 frotas simuladas

³O conceito de *produtividade* é aqui utilizado em substituição de *função-objectivo*, apenas por

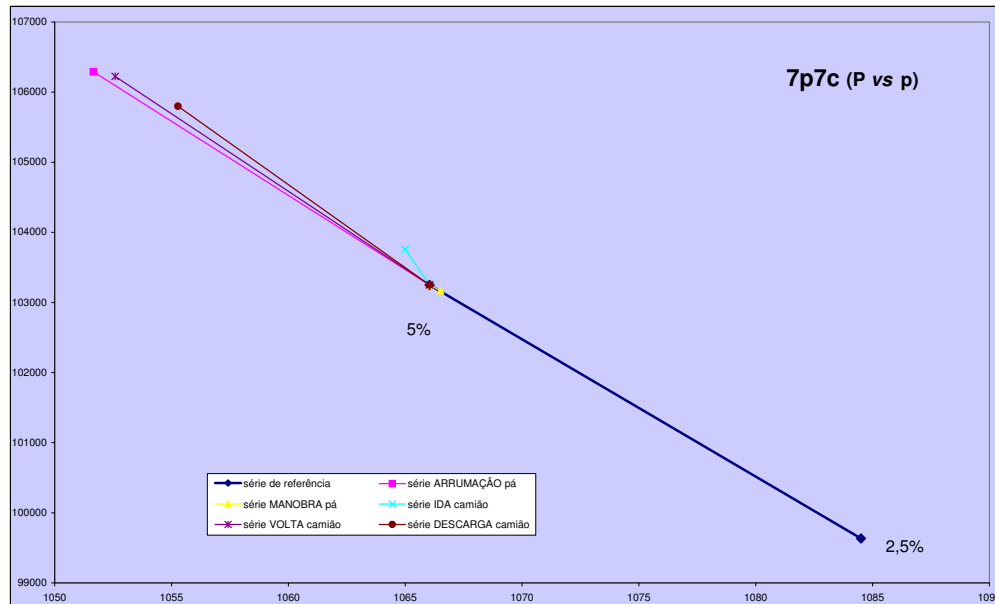


Figura 5.9: Gráfico comparativo do comportamento do par (P, p) , em função do pendente atribuído a cada uma das cinco diferentes actividades.

e para os dois casos considerados: $cv = 2,5\%$ e $cv = 5\%$. O objectivo foi o de averiguar se de entre as *frotas-pico* havia alguma(s) que se constituísse(m) como conjunto intercepção, e nela(s) estudar mais aprofundadamente a possibilidade de a tarefa *manobra unitária da pá* se constituir como crítica.

A análise das figuras 5.10, 5.11, 5.12 e 5.13 permite concluir que as únicas

uma questão de nomenclatura, e não propriamente como definição estrita. Na realidade é discutível considerar *tempo de paragem* como algo penalizante em termos de *produtividade*. É evidente que se a paragem de determinado sector implicar paragem no sistema, a consequência é penalizante; todavia, se a paragem de determinada máquina não interferir com o normal funcionamento do sistema, pode até ser benéfico, quanto mais não seja sob o ponto de vista de aumento de vida útil da mesma (poder-se-á concluir que o sistema está sobredimensionado, mas essa é uma outra questão). Um conceito de *produtividade* que assente no quociente entre *produção* e *tempo total pago* – ou entre *produção* e *custo total* (investimento mais custos operativos), poderia ter legitimidade para ser analisado, porém esse não foi um objectivo delineado para o presente trabalho.

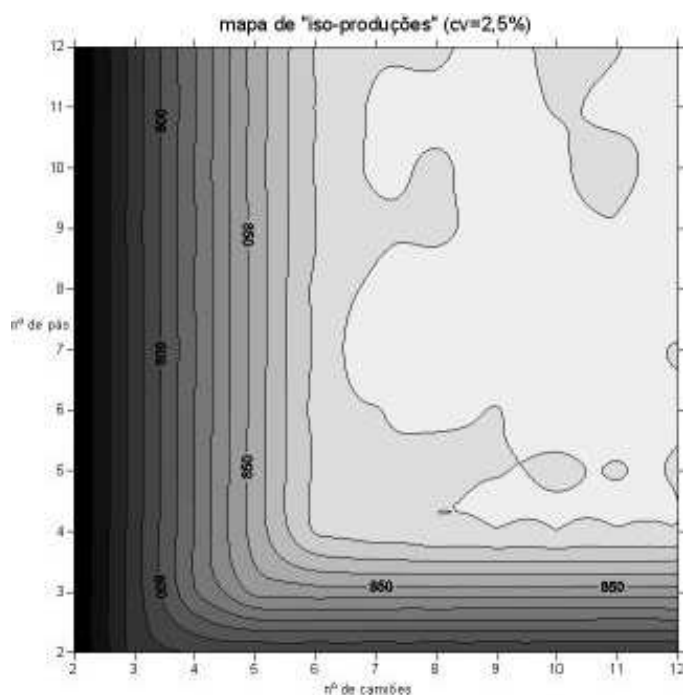


Figura 5.10: Mapa de iso-produções, referente a 121 frotas ($cv=2,5\%$).

frotas-pico comuns aos quatro mapas são as configurações *3p5c* e *4p6c*. Ambas tinham já sido anteriormente estudadas, sendo que na primeira a *manobra unitária da pá* parece ter um papel preponderante no funcionamento do sistema, enquanto que na segunda não se encontrou vestígios do “fenómeno” que se perseguia.

Acerca dos mapas de isoprodução

Podemos concluir que apesar da existência da *manobra unitária da pá* como actividade reguladora da dinâmica do sistema não constituir regra, esse “fenómeno” acontece em determinadas frotas.

A consulta dos gráficos das figuras 5.10 e 5.11 mostra, aliás, que a hipótese por nós levantada não é totalmente desprovida de sentido, como poderá ser verificado através de uma análise cuidada dos mapas apresentados nessas duas figuras.

Antes, porém, de se avançar com alguma cogitação importa reflectir naquilo que estes mapas traduzem. Eles são uma representação “em contínuo” – isoli-

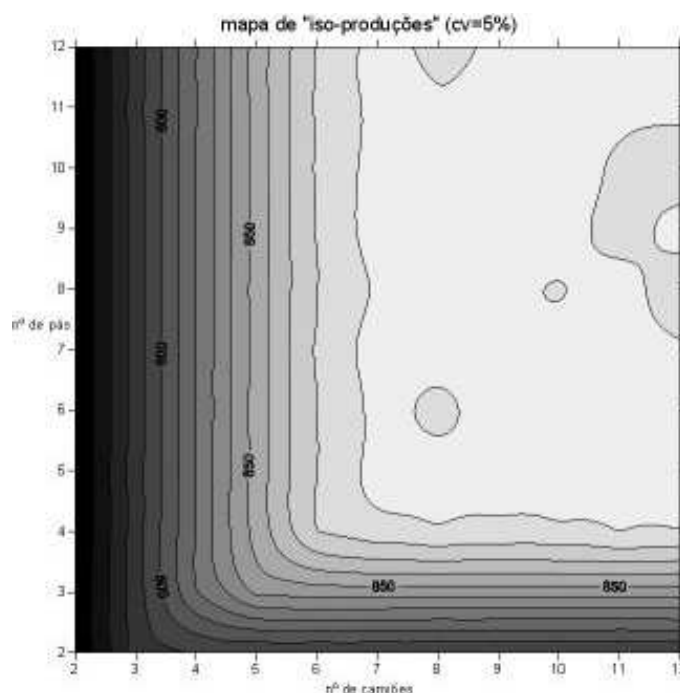


Figura 5.11: Mapa de iso-produções, referente a 121 frotas (cv=5%).

nhas – de algo que tem carácter discreto: número inteiro de pás-carregadoras e camiões. Se, por um lado, temos consciência de que na prática apenas podemos obter as produções que resultem das intercepções *número de pás/número de camiões* – no fundo, os valores apresentados na tabela 5.1 – também sabemos que esse facto pode ser, se não totalmente ultrapassado, pelo menos mais suavizado com a introdução de unidades quer de carga quer de transporte com capacidades distintas. Essa situação não foi, de facto, matéria de estudo no presente trabalho mas é uma possibilidade em aberto, acerca da qual não nos deteremos mais alongadamente de momento, na medida em que vai ser objecto de análise em capítulo subsequente.

Quanto à validade prática dos mapas, pensamos que a legitimidade lhes é conferida pelo facto de em se tratando de isomapas, não haver cruzamento ou intercepção de linhas.

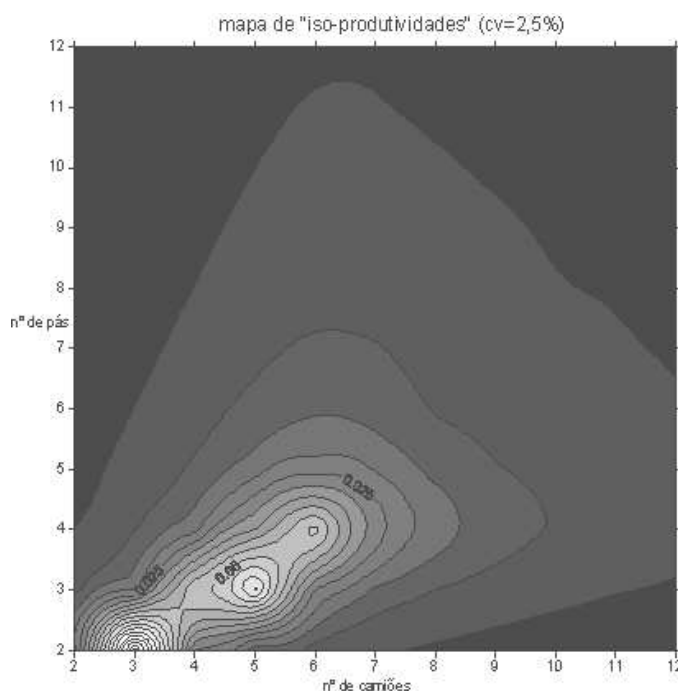


Figura 5.12: Mapa de iso-produtividades, referente a 121 frotas (cv=2,5%).

A primeira grande mais-valia que resulta da construção deste tipo de representação é a de mostrar comportamentos que apesar de serem expectáveis – não só para quem constrói e explora um modelo deste tipo, mas também para quem conhece a realidade prática do tipo de sistemas que aqui são estudados – não são observáveis na prática. Estes mapas são ainda tradutores de algum carácter sistémico do modelo, na medida em que determinados comportamentos, apesar de serem esperados pelo modelador, não são controlados pelo mesmo. Ele não domina com exactidão as componentes do programa que os originam. De outra forma: se quisermos retirar ou salientar determinado efeito – expectável quando criamos o modelo – não sabemos com exactidão onde, no programa, devemos actuar.

Como exemplo primeiro salienta-se a possibilidade de visualizar a anteriormente conhecida noção de **produção patamar**⁴; isto é: a consciência de que não

⁴Utilizar-se-á conceitos próprios da topografia, por apresentarem a dupla vantagem de se coa-

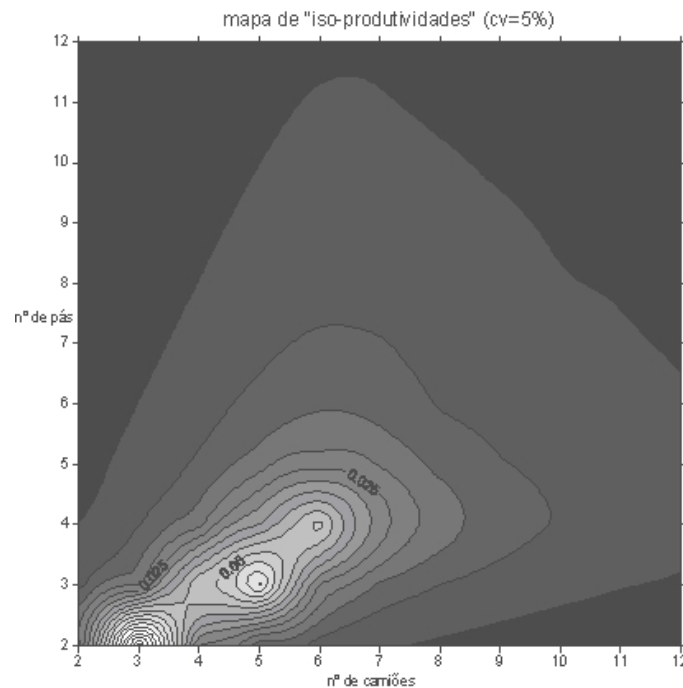


Figura 5.13: Mapa de iso-produtividades, referente a 121 frotas (cv=5%).

adianta aumentar indefinidamente o tamanho da frota, na medida em que, a partir de determinada dimensão o valor da produção atinge um pico inultrapassável⁵, pode ser perfeitamente visualizada em qualquer dos gráficos das figuras 5.10 ou 5.11, e é representada pela zona de planalto.

A noção de **frotas equivalentes** – frotas que, não obstante terem configurações e razões *unidades carregadoras/unidades transportadoras* distintas, originam iguais valores de produção – é também uma das informações há muito adqui-

dunarem com o tipo de representação exprimida por estes mapas e por serem analogias familiares a quem se ocupe de problemas da área mineira, nomeadamente aqueles do âmbito da lavra.

⁵Importa aqui relembrar que existe uma constricção a jusante do sistema em estudo, imposta pela velocidade de descarga do britador; isto é: mesmo que a tolva tenha hipotética capacidade infinita de recepção de matéria-prima, a descarga desta para o britador faz-se através de um alimentador, o qual, por seu lado, tem a sua velocidade de descarga limitada pela capacidade de cominuição do britador.

O valor de produção – P – do sistema em estudo, é medido à saída do britador; motivo pelo qual um aumento infindo da dimensão da frota não se traduz num correspondente aumento do valor da produção, mas apenas na criação de uma espécie de “stock na tolva”.

Esta explicação justifica o aparecimento dos patamares nos *mapas de isoproduções*.

ridas, e que pode agora ser visualizada em qualquer um dos mapas em estudo (no fundo, é isso que cada isolinha representa: uma família de frotas cuja característica comum está no facto de possuírem igual capacidade de produção). A ideia de frotas equivalentes aponta para o conceito de **frotas mínimas**, que serão aquelas configurações que – de entre as que conduzem a igual valor de produção – apresentam menor número de pás-carregadoras e de camiões. Também essa “família” de frotas pode ser visualizada nos dois gráficos em estudo e corresponde à linha de festo, que resulta da intercepção dos dois planos que representam as superfícies dos taludes.

Quanto à análise comparativa dos dois taludes, o facto de possuírem inclinações distintas fornece uma informação cuja relevância vai de encontro à nossa suspeição anterior de que as unidades carregadoras – seja por via da *manobra unitária* das mesmas, seja por outra(s) circunstância(s) – poderão, sob certas condições, ter um papel mais decisivo no condicionamento da produção, quando comparado com o papel das unidades de transporte. De facto, não só na frota *2p6c* – que foi a responsável pelo levantamento da nossa hipótese – mas em todas aquelas em que a *manobra unitária da pá* parece condicionar a produção, a introdução de mais uma unidade carregadora induz a um aumento significativo de produção, enquanto que a introdução de mais uma unidade transportadora ou não reflecte nenhum aumento de produção, ou origina um aumento menos significativo.

Ainda acerca dos taludes, é de realçar que, em ambos, as isolinhas são aproximadamente rectilíneas, sendo que no talude da direita as isolinhas estão mais próximas entre si – mais inclinação – pelo que, consequentemente, uma frota que se encontre nessa zona aumenta muito mais significativamente a produção por incremento de uma unidade carregadora, do que numa situação análoga aconteceria se a uma frota situada no talude da esquerda acrescentássemos uma unidade transportadora. Isto é: as linhas de isoprodução estão mais próximas entre si no talude de acesso ao planalto – produção patamar – quando dependem do número de pás, e mais afastadas entre si no talude de acesso ao planalto quando na maior depen-

dência do número de camiões. De salientar ainda que o maior comprimento do talude que depende do número de camiões pode justificar o conhecimento técnico-prático de que o número de unidades transportadoras deverá ser sempre superior ao número de unidades carregadoras.

Um novo conceito

Duma primeira análise dos mapas das figuras 5.12 e 5.13 ressalta a existência de uma linha de cumeada, constituída pelos três picos correspondentes às frotas $2p3c$, $3p5c$ e $4p65c$. Esta não é uma constatação surpreendente, na medida em que se trata de frotas mínimas: frotas que, nos mapas das figuras 5.10 e 5.11 integram a linha de festo.

As informações mais interessantes surgem, todavia, quando abandonamos as cotas mais elevadas e nos começamos a deslocar ao longo das encostas: em certos casos o incremento de uma unidade (carregadora ou transportadora) provoca uma diminuição no valor da *função objectivo*, o que nos induz a concluir que o correspondente aumento da produção (numerador) – reflexo de um aumento na dimensão da frota – não é suficiente para compensar o aumento do tempo total de paragens (denominador), originado pela introdução de mais uma máquina.

Se olharmos ainda mais atentamente esse fenómeno, verificamos que ele acontece quando se passa acima de 6 camiões, ou acima de 4 pás, o que significa que, ao contrário do que acaba de ser dito no parágrafo anterior, o motivo que está na base de a *função objectivo* sofrer um decréscimo nem sequer se relaciona com facto de o aumento de P não compensar o respectivo aumento de p , mas sim com o facto de não existir qualquer aumento no valor de P , como pode ser verificado por consulta dos mapas constantes das figuras 5.10 e 5.11 (são frotas que, nos mapas de *produção*, integram a zona de planalto).

Estamos em crer que estas aparentemente inócuas constatações nos permitem chegar a um novo conceito: o das **frotas máximas**. Vejamos: uma hipotética intercepção entre as superfícies *produção* e *função objectivo* resultaria numa linha que

coincidiria com a linha de contorno do planalto constante nos mapas de *produção*, o que significa que, como já verificamos anteriormente nesses mesmos mapas, e sob o estrito ponto de vista da *produção*, a definição de qualquer configuração de frota situada para além dessa linha não se traz em qualquer contrapartida. Como verificamos agora nos mapas de *função objectivo*, aumentar acima de 4 pás ou 6 camiões significa diminuir ao valor desta função. Somos, pois, levados a concluir que essa linha de intercepção das superfícies *produção* e *função objectivo* corresponde à delineação daquilo a que decidimos chamar **linha de fronteira das frotas máximas**: linha acima da qual o único critério, essencialmente sob o ponto de vista da *produção*, que se nos insinua como válido para o estabelecimento de uma frota, é o de pretendermos manter uma frota folgada; isto é: numa hipotética situação em que a exploração se encontre a laborar para um cliente principal, com rigorosas exigências ao nível da quantidade da produção e sem que haja possibilidade de criação de confortável *stock* intermédio, uma eventual paragem (não contemplada no nosso algoritmo) – por necessidade de reparação ou mesmo para rotineira manutenção – de uma máquina, poderia comprometer os valores de produção requeridos.

A definição de uma configuração de frota que se situe no **patamar de garantia de produção** pode, desta forma, ser justificada como forma de permitir que se labore com alguma folga relativamente a uma situação limite.

Capítulo 6

Coda

*“...resolver um mistério não equivale
a recolher muitos dados particulares
para depois inferir deles uma lei geral.
Significa antes encontrar-se diante de
um, dois ou três dados particulares, que
aparentemente não tem nada em comum,
e procurar imaginar se podem ser outros
tantos casos de uma lei geral que não
conheces ainda e que talvez nunca tenha
sido enunciada...”*

Guilherme de Baskerville

“...e que talvez nunca venhas a conhecer”

(acrescento eu)

Coda, *s.f.* MÚS. Termo de origem italiana pelo qual se designa, em alguns casos, a parte terminal de um trecho de música. Primitivamente, a *coda* não passava de dois ou três compassos, acrescentados aos cânones perpétuos, para os dotar de uma conclusão. Na *fuga*¹, a *coda* perde o sentido de acrescentamento, e insere-se intimamente no desenvolvimento da composição.

[Grande Enciclopédia Portuguesa e Brasileira]

6.1 Opção por um caminho

Através da simulação pretende-se averiguar o funcionamento de um sistema real, por recurso a um ambiente virtual no qual são gerados modelos que se pretende tenham um comportamento análogo, ou o mais aproximado possível ao da realidade. Nesse sentido, o modelo deve considerar a variabilidade do sistema, por forma a traduzir a real dinâmica do mesmo: a simulação tem que incluir a própria passagem do tempo, não apenas para traduzir a dinâmica que no sistema real se caracteriza por uma sucessão de eventos que ocorrem ao longo do tempo, mas – não menos importante – para o estabelecimento de um histórico artificial do fenómeno em estudo.

Sendo certo que o fundamento para a implementação de uma determinada realidade num modelo passa por uma necessidade de compreender o comportamento dum fenómeno real ou idealizado, não é menos verdade que o principal intuito da simulação não se prende apenas com a representação, de forma o mais fidedigna possível, de um determinado sistema, mas sim com a condução de experiências que permitam avaliar as interacções traduzidas pelo funcionamento conjunto dos diferentes componentes, bem como prever comportamentos do sistema em face

¹Forma musical polifónica frequentemente terminada por uma *coda*, na qual o tema ou sujeito faz a sua última aparição, e como que resume, de uma forma impressiva, o carácter da composição, acompanhado em geral de acordes que lhe reforçam a expressão. A *fuga* é considerada o organismo sonoro de maior lógica construtiva existente na história da música. por isso, ainda hoje ela é utilizada com fins pedagógicos, no sentido de habituar o aspirante a compositor a uma disciplina rigorosa de pensamento...

das mais variadas condições de operação, com o objectivo último de avaliar distintas estratégias operativas.

Este conceito – de exploração do modelo – surge como contraposição à ideia – redutora – de que *simulação* consiste apenas na concepção de um modelo e subsequente implantação de uma rotina que, se espera, simule o sistema cujo modelo representa. Se a simulação aparece como uma artifício ao qual se lança mão, na tentativa de compreender alguma componente do mundo que nos rodeia, a nossa vontade, necessidade ou simples curiosidade acerca de determinada realidade do meio físico não pode ficar perfeitamente satisfeita após a concepção do modelo.

Serve este intróito como justificação, *à posteriori*, de uma opção tomada no início dos trabalhos que conduziram à redacção do presente documento. Sendo este um trabalho de continuidade de uma linha de investigação, o percurso que levou à progressiva integração do autor destas linhas na respectiva equipa de trabalho, seguiu as habituais etapas de análise de trabalhos e percursos pretéritos.

Usualmente, o investigador, mesmo que integrado numa equipa de trabalho, sente a necessidade – não totalmente desprovida de forte componente emocional – de conceber o seu próprio modelo. No presente caso, porém, uma análise racional apontou para o imperativo de levar mais além a exploração do modelo de Leite [Leite, 1998], na medida em que aquele autor, por constrições várias nomeadamente as directamente relacionadas com a velocidade dos processadores existentes à data da sua concepção, apenas o tinha explorado parcialmente.

O modelo de Leite [Leite, 1998], e o correspondente algoritmo: *AL9701*, para além de traduzirem de forma muito satisfatória uma realidade que não me era à partida desconhecida, apresentavam algumas características fundamentais à sua exploração, como sejam a facilidade e rapidez com que era possível variar os parâmetros fundamentais do sistema. A validade do algoritmo foi testada por simulação de situações conhecidas, e a sua robustez foi posta à prova ao testar-se a ruptura do mesmo por implementação de parâmetros limite.

Importa realçar que, de entre as dúvidas, hipóteses e questões que se nos le-

vantaram durante o estudo do trabalho produzido por Leite [Leite, 1998], houve uma interrogação que de imediato ocupou lugar de destaque e que originou alguma ansiedade. Acontece que a partir do algoritmo AL9701, e introduzindo-lhe algumas modificações, nos pareceu possível começar de imediato a procurar respostas para as nossas inquietações. Desta forma, por um lado assumindo o risco de utilizar como base de partida um modelo e respectivo algoritmo preexistente, mas por outro colhendo daí as confortáveis contrapartidas que resultam do facto de se poder reiniciar a investigação sem mais delongas, partiu-se para os trabalhos que viriam a culminar no presente documento.

Resta acrescentar que, à medida que ao longo do desenrolar dos trabalhos novas inquietações iam assomando ao nosso espírito e novas hipóteses iam sendo desenvolvidas, o algoritmo AL9701 foi sendo progressivamente alterado e reestruturado – de acordo com o que foi já afluído em capítulos anteriores – vindo, na fase final, a dar origem ao algoritmo ALJP0309LZ, que apesar de todas as modificações por que passou, mantém razoavelmente a estrutura do programa que lhe deu origem.

6.1.1 E no entanto existe um patamar

“O senhor Palomar encontra-se na praia, de pé, e observa uma onda. Não se pode dizer que esteja absorto na observação de ondas. Não está absorto, porque sabe muito bem aquilo que faz: pretende observar uma onda e observa-a.

... não são as “ondas” que ele pretende observar, mas uma única onda e basta: querendo evitar as sensações vagas, estabelece para cada um dos seus actos um objectivo limitado e bem definido.

... Mas isolar uma onda, separando-a da onda que imediatamente se lhe segue e que parece empurrá-la, e que por vezes a alcança e a arrasta consigo, é muito difícil; assim como separá-la da onda que a precede ...

... Em resumo, não se pode observar uma onda sem ter em conta os aspectos complexos que concorrem para a sua formação e aqueles outros, igualmente complexos, a que essa mesma onda dá lugar. Estes aspectos variam continuamente, pelo que uma onda é sempre diferente de uma outra onda; mas também é verdade que cada onda é igual a uma outra onda, mesmo que não seja aquela que lhe é imediatamente contígua ou sucessiva; em resumo, existem formas e sequências que se repetem, ainda que irregularmente distribuídas no espaço e no tempo. Como aquilo que o senhor Palomar pretende fazer neste momento é simplesmente ver uma onda, ou seja, colher todas as suas componentes sem descurar nenhuma delas, o seu olhar deter-se-á no movimento da água que bate na costa, até poder registar aspectos ainda não recolhidos anteriormente; assim que se aperceber de que as imagens se repetem, saberá que viu tudo o que queria ver e então poderá parar...

... O senhor Palomar procura agora limitar o seu campo de observação; se ele considerar um quadrado, digamos de dez metros de mar, pode fazer um inventário completo de todos os movimentos de ondas que ali se repitam com variadas frequências, num dado intervalo de tempo. A dificuldade consiste em fixar os limites desse quadrado ...

... De qualquer modo o senhor Palomar não desanima e pensa, em cada momento, que viu tudo aquilo que podia ver a partir do seu ponto de observação; mas acaba por aparecer sempre qualquer coisa que ele não tinha tomado em consideração. Não fora esta sua impaciência por alcançar um resultado completo e definitivo através da sua operação visual, o observar das ondas seria para ele um exercício muito repousante e poderia salvá-lo da neurose, do enfarte e da úlcera gástrica. E talvez pudesse ser essa a chave para dominar a complexidade do mundo, reduzindo-a ao seu mecanismo elementar...

... Fixar a atenção sobre um pormenor fá-lo saltar para o primeiro plano e invadir o quadrado ...

Não obstante o privilégio concedido por esta equipa de investigação à criação e estudo de modelos de carácter estocástico², os autores Miranda e Leite [Miranda e Leite, 1996] desenvolveram, em conjunto, uma investigação sob uma perspectiva determinística, com a intenção de estabelecer eventuais paralelismos entre os resultados obtidos com valores provenientes das suas simulações de carácter estocástico. Na realidade, apesar da legitimação da abordagem determinística – conferida pela constatação da coerência de resultados entre esta e a de carácter probabilístico – nenhuma das duas forneceu informação satisfatória relativamente à eventual existência de uma influência directa entre a variabilidade das actividades e os *outputs* obtidos. À data do início dos trabalhos que presidiram à elaboração do presente texto, ignorávamos se uma maior ou menor dispersão na colecção de tempos de execução de cada uma das diferentes actividades implicaria correspondente variação nos valores das variáveis *produção* e *somatório dos tempos totais de inactividade*.

A única alusão, digna de algum realce³, feita nesse sentido foi aquela cuja informação aparece resumida no gráfico da figura 3.1, e que corresponde à figura XI – 40 do trabalho de Leite [Leite, 1998]. Aquele autor estabeleceu – dentro da simulação estocástica – o *grau de determinismo* como sendo o inverso do *coeficiente de variação*.

Da observação do referido gráfico, as primeiras conclusões apontam para que uma aproximação ao determinismo faça diminuir os tempos perdidos, aumentando o rendimento de cada máquina, o que se traduz num aumento de *produção*, acompanhado duma diminuição do *somatório dos tempos totais de inactividade*. Somos, assim, levados a concluir que uma menor variabilidade das actividades

²De onde se pode destacar os já referenciados trabalhos: [Miranda, 1986], [Leite, 1990] e [Leite, 1998].

³O trabalho de Leite [Leite, 1998] prendeu-se com outros aspectos, pelo que a sua abordagem a esta questão foi necessariamente superficial, porque deslocada do caminho por si traçado.

(situação mais determinística) implicaria uma maior regularidade. Todavia, apesar da tendência do gráfico ser a que acaba de ser explicada, no traçado do mesmo existe um patamar que corresponde a uma situação em que, na passagem de um valor de uma variável de *input* – *coeficiente de variação* – para outro valor da mesma variável, mas de características mais desordenadas, o valor da variável de *output* – *produção* – se mantém inalterado. Essa constatação implica que as conclusões acima retiradas não podem, de ânimo leve, ser generalizadas.

A questão que se nos afigurou como pertinente foi a de averiguar qual o papel da variabilidade dos dados na obtenção de resultados finais. De outra forma: será que existiria de facto uma relação inequívoca entre a variabilidade das actividades e o valor das variáveis de *output*, nomeadamente a *produção* e o *somatório dos tempos totais de inactividade*?

Primeira abordagem

O carácter heurístico resultante de uma simulação estocástica resulta do facto de este ser um processo experimental, pelo que a solução obtida não é óptima, porquanto não seja possível experimentar todo o universo de soluções. Pode e deve existir a ambição de apurar características e propriedades com base nos resultados obtidos, mas não pode nunca haver a pretensão de encontrar resultados óptimos em face do estabelecimento de regras absolutas.

Deste modo, tendo à partida a consciência de que a restrição de gamas a testar iria ser uma realidade presente de forma permanente ao longo de todo o processo de investigação, traçamos o caminho e pusemo-nos em marcha, tendo à partida, como limite um vasto horizonte; sabendo todavia que este sofre – por força da própria caminhada – constante actualização.

Numa primeira abordagem, pretendemos abarcar a totalidade do intervalo de valores que a variabilidade – aqui representada pelo *coeficiente de variação* – pode tomar.

As informações que inicialmente recolhemos acerca da variável de *output* –

produção – à qual se deu, naquela fase, preponderância de análise, apontaram de imediato para a conclusão de que diferentes gamas correspondiam a diferentes comportamentos e que, conseqüentemente, a conclusão de que uma aproximação ao determinismo implica um aumento da *produção*, constitui uma análise precipitada. Tínhamos, pois, matéria para avançar, e assim fizemos.

Sem que nos detenhamos desnecessariamente em torno de pormenores anteriormente analisados em capítulos de carácter exploratório, importa apenas referir que foi necessário ir estreitando a gama de valores testados, compensando-se todavia esta opção, com diversas acções de refinamento, como sejam, por exemplo, o “aperto” do passo de amostragem, mas também o recurso a uma série de outros mecanismos, como sejam o aumento do número de repetições por simulação ou a diversificação das configurações de frota.

Diferentes cenários foram sendo elaborados e testados, sendo que a informação mais relevante se prende com a opção de termos passado a trabalhar “em cima” de gamas de *coeficiente de variação* (ou, mais especificamente de *desvio-padrão*) que se situavam numa zona que definimos como “próxima do determinismo”.

Quanto à relevância das informações nesta fase recolhidas, salienta-se a constatação de que, nas condições estabelecidas, **não existia dependência linear entre a variabilidade e a *produção***.

Segunda abordagem

Na linha de investigação dos trabalhos anteriores, com destaque para o desenvolvido por Leite [Leite, 1998], importava analisar o comportamento de uma *função objectivo* (a que aquele autor se referiu como *produtividade*), definida pelo quociente entre a *produção* e o *somatório dos tempos totais de inactividade*.

A expectativa inicial era a de que esta *função objectivo* devesse sofrer um acréscimo à medida que nos fôssemos aproximando do determinismo: esperava-se um simultâneo aumento dos valores da *produção* e uma diminuição dos valores

da variável *somatório dos tempos totais de inactividade*.

Relativamente à *produção*, sabíamos já que a expectativa tinha sido gorada. Restava-nos agora testar o comportamento da variável *somatório dos tempos totais de inactividade*.

Conseguimos mostrar que, de acordo com as condições definidas, **não era possível estabelecer uma relação linear inequívoca entre a variabilidade das actividades e a variável *somatório dos tempos totais de inactividade***.

Terceira abordagem

Pese embora nesta fase não o tenhamos conseguido, não desistimos de tentar estabelecer uma relação válida entre a variabilidade e o *somatório dos tempos totais de inactividade*. Fomos em busca de padrões comportamentais que nos permitissem definir algum tipo de dependência entre estas duas variáveis.

Todavia, e apesar de termos voltado a abrir, até às 144, o leque de configurações de frota estudadas, este desvio infligido ao nosso caminho acabou por se revelar pouco profícuo, forçando-nos a posterior inversão, para que pudéssemos retomar o trilho que vinha sendo anteriormente traçado.

Quarta abordagem

Devido à incapacidade de definição de uma regra que estabelecesse relações claras quer entre a variabilidade e *produção*, quer entre variabilidade e *somatório dos tempos totais de inactividade*, afigurou-se-nos como óbvio que o passo seguinte passasse por explorar o comportamento conjunto destas duas variáveis; isto é: o comportamento da *função objectivo*.

De acordo com os critérios estabelecidos, **conseguimos mostrar que**, em certos casos, **um aumento da variabilidade** (leia-se: “um afastamento do determinismo”) **implicava um aumento** de *produção* acompanhado de uma diminuição de *somatório dos tempos totais de inactividade*; isto é: um aumento de “desordem” era responsável pelo facto de ambas as componentes da *função objectivo*

concorrerem para um aumento do seu valor: numerador a crescer e denominador a decrescer.

Quinta abordagem

Em face dos resultados anteriores, voltamos a alargar a gama de configurações de frota e fomos analisar a totalidade de combinações de comportamento (aumento, diminuição ou constância) conjunto das variáveis *produção* e *somatório dos tempos totais de inactividade*, com vista à sua tipificação.

Num universo de 48 diferentes configurações de frota testadas, **mostramos que**, dependendo das condições, **todas as combinações de comportamento conjunto de produção e somatório dos tempos totais de inactividade podem ocorrer.**

Devido às dificuldades em estabelecer as condições que presidem à ocorrência das diferentes combinações, **concebemos uma representação gráfica do comportamento conjunto de quatro variáveis** (sendo uma delas booleana), cuja interpretação carece, todavia, de um desenvolvimento mais satisfatório.

6.1.2 Caos et al – em torno de dinâmicas não-lineares

Se considerarmos que o estudo dos sistemas não-lineares se encontra – por contraposição com os lineares – ainda em fase embrionária, é legítimo que a expectativa de quem se ocupe da árdua tarefa de estudar as dinâmicas não-lineares inerentes a sistemas que revelam comportamentos inesperados e de considerável complexidade não obstante emergirem de formulações definidas por regras aparentemente simples, seja ambiciosa. Todavia, ao longo do trabalho por nós desenvolvido, viria a revelar-se-nos como reconfortante a possibilidade de contribuir com vasta quantidade e diversidade de dados. Este terá, porventura, sido o nosso humilde contributo: assinalamos e mostramos comportamentos inesperados e que goraram expectativas ditas “de bom senso”.

Fomos, ao longo do trabalho desenvolvido, renovando constantes buscas de

padrões que pudessem esconder leis que regessem os comportamentos complexos que iam sendo detectados. As contínuas actualizações do rumo à partida traçado, apontavam para que nos embrenhássemos no estudo dessa dinâmica responsável por efeitos “estranhos”, que são aqueles que caracterizam a dinâmica do caos.

Apesar de termos consciência de que a teoria do caos surgiu em sistemas determinísticos, se bem que muito complexos, e de que a simulação por nós desenvolvida é de carácter estocástico, sabemos também que as gamas com que fomos progressivamente trabalhando se situam numa zona muito “próxima do determinismo”. Isto é: a simulação é estocástica mas a variabilidade das actividades é, para além de definida num intervalo muito apertado, representada por valores de *desvio-padrão* e, consequentemente, de *coeficiente de variação*, que se situam numa zona de características determinísticas.

Poderá ser esta uma primeira explicação para o aparecimento de semelhanças comportamentais entre o sistema por nós simulado e os de carácter determinístico, detectadas apenas na zona que definimos como “próxima do determinismo”.

Sexta abordagem

As dificuldades em estabelecer regras e padrões representativos dos fenómenos comportamentais até aqui detectados, aliadas a constrições de diversa ordem, impeliram-nos a seleccionar uma configuração de frota que simultaneamente evidenciasse esses comportamentos inesperados e que constituísse denominador comum entre o presente trabalho e os que o precederam, e sobre ela fazer incidir a exploração do algoritmo.

Os objectivos para esta fase traçados consistiram em abrir uma janela de maior detalhe sob dois pontos de vista: por um lado, actuar duplamente sobre o intervalo de variação do desvio padrão, encurtando-o e estreitando o passo de observação; e por outro lado, aumentar de forma progressiva o número de relevos.

Conseguimos detectar a existência do fenómeno dentro do fenómeno; isto é: um redimensionamento da escala continuou a evidenciar a presença das diferen-

tes combinações de comportamento conjunto das variáveis *produção* e *somatório dos tempos totais de inactividade*, tipificados anteriormente.

As conclusões retiradas em consequência de sucessivos refinamentos apontavam para que o comportamento das variáveis em estudo não estivesse dependente do grau de detalhe com que era feita a observação. Esta semelhança de resultados produzidos a diferentes escalas de observação indicava a possibilidade de estarmos na presença de um **comportamento de características fractais**.

Dos vários caminhos ensaiados importa salientar a reestruturação do programa, com vista a permitir um aumento quer da precisão do cálculo quer da vida útil simulada da exploração. Após um moroso estágio de simulação em que se testou 8 mil anos de funcionamento da mina, deparamo-nos pela primeira vez com um cenário em que deixava de haver aumentos de *produção* em função dum aumento da desordem. Todavia, registamos oposto comportamento da variável *somatório dos tempos totais de inactividade*. Esta informação revelou-se tanto mais relevante quando verificamos que, no intervalo estudado, o mais elevado valor de produção era conseguido com o mais elevado valor da variável *somatório dos tempos totais de inactividade*, o que apontava para a **indispensabilidade da existência de pausas**, no caso de se pretender atingir a *produção* requerida.

Sétima abordagem

Na sequência dos resultados obtidos na abordagem anterior, importava analisar em maior detalhe e sob outro ponto de vista o comportamento da variável *somatório dos tempos totais de inactividade*. Uma vez mais se interveio no programa, por forma a que este debitasse não a média, mas antes a totalidade dos valores correspondentes a outros tantos relevos considerados em cada simulação. A expectativa – da existência de um atractor pontual – não se verificou, não obstante pensarmos ter detectado a existência de atractores de características zonais.

As características imutáveis – nomeadamente a constância da curva de delineação da bacia de atracção – das nuvens de pontos que fomos sucessivamente ob-

tendo, em face de diversas condições de partida impostas, indicavam que o estudo do nosso sistema de características não-lineares teria que passar pela **dinâmica do caos**.

Todas estas informações contribuíram para confirmar a anterior percepção de que o nosso sistema – aparentemente simples – era afinal muito mais complicado do que parecera numa primeira análise: **encontramos atractores regionais**, verificamos a inalterabilidade da linha – **fractal** – que delimita a bacia da atracção, encontramos semelhanças entre alguns dos nossos gráficos e as **secções de Poincaré**.

Oitava abordagem

Dentro da dinâmica não-linear, importava apurar a dependência das condições iniciais. Fomos averiguar se alguma das actividades teria papel preponderante sobre as outras. Dado que, após a simulação dos primeiros cenários por nós definidos, uma determinada operação – sempre a mesma – parecia condicionar a dinâmica do sistema, sentimos necessidade de, uma vez mais, alargar o universo de configurações de frota até às 144. Foi mais uma morosa fase de corridas, no final da qual verificamos que, em algumas frotas, havia uma actividade que se afirmava como tarefa crítica. Todavia, e apesar da tarefa ser sempre a mesma, não nos foi possível estabelecer uma relação entre as frotas onde esse facto foi registado.

Não obstante termos conseguido mostrar conceitos como o de **produção patamar**, o de **frotas equivalentes** e o de **frotas mínimas**, e de termos apresentado o conceito de **frota máxima/patamar de garantia de produção**, ficou por definir em que condições uma dada tarefa se apresenta como crítica.

6.2 Registo de intenções

Ao iniciarmos esta fase da redacção somos invadidos por contraditórios sentimentos: à reconfortante sensação do dever cumprido, contrapõe-se um amargo sabor a frustração, reflexo da brusca interrupção que nos é imposta.

Encaremos, pois, um ponto de vista contrário àquele que nos diz que o doutoramento é em si um projecto de investigação. Assumamos, então, que dentro de um vasto projecto de investigação se inserem os trabalhos conducentes ao cumprimento de uma etapa fundamental na carreira que nos propusemos abraçar. Acreditemos que paramos por breves instantes para dar cumprimento às necessárias formalidades e retomemos, quanto antes, a busca de respostas para a extensa compilação de interrogações que diariamente vamos coleccionando.

Propósitos de continuidade

O formato – de carácter evolutivo – optado para expor alguns dos potenciais desenvolvimentos futuros prende-se exactamente com graduais estágios de ambição que gostaríamos de poder ir vendo serem sucessivamente cumpridos.

Neste contexto, comecemos por discorrer acerca daquilo que são objectivos que acreditamos venham a ser satisfeitos a curto prazo, e que se prendem com as ainda inúmeras possibilidades de diversificar a exploração do modelo; tendo como pressuposto de partida que os diferentes *fenómenos não esperados* apresentam as características comuns de terem sido observados quer numa banda estreita de valores de variabilidade, quer em gamas muito baixas⁴.

Esta via compreende o imenso grupo de todas as possíveis intervenções no programa de entrada de dados, que nos afastem das condições supostamente próximas do óptimo, que estabelecemos para a simulação das nossas frotas quase-síncronas.

Se relacionarmos cada uma dessas intervenções com aquilo que pretendemos que cada uma delas represente em termos de simulação do meio físico⁵, damo-nos

⁴Pelo que, mais do que a resolução de um problema de engenharia, estivemos a fazer a análise matemática de um processo; na medida em que, na prática, as referidas condições seriam de difícil implementação, por obrigarem a uma disciplina férrea, eventualmente não isenta de aspectos repressivos.

⁵Quando nos referimos às diferentes possíveis condições de operação da exploração mineira, olhamos tanto os limites do objecto sendo simulado, como os limites de carácter ambiental, impostos por condicionalismos externos, intrínsecos ao meio onde se insere o sistema. Rapidamente nos aperceberemos que entre uns e outros existe uma rede de ligações.

conta de que uma mesma alteração poderá significar mais do que uma realidade – em termos de funcionamento da mina – sendo simulada. Da mesma forma nos apercebemos que a simulação de uma dada realidade operativa da exploração poderá ser obtida por distintas intervenções no ficheiro de entrada de dados. Surgirá aqui a necessidade de estabelecer uma primeira rede de ligações que relacione entre si, por um lado, diferentes realidades de operação e, por outro, diferentes possíveis alterações a infligir no algoritmo; e, finalmente, umas e outras.

Avançando, agora noutra direcção

Apresentados que estão aqueles que assumimos como imediatos compromissos futuros, e que acreditamos vir dentro em breve a levar a cabo como consequência natural do trabalho até aqui desenvolvido, passaremos a expor algumas possíveis vias de desenvolvimento deste tema, cuja exequibilidade será mais facilmente tornada realidade com a inclusão de novos membros na actual equipe.

Pensamos que um caminho interessante poderia passar por encontrar um outro sistema, com lógicas e filosofias distintas das preconizadas para aquele que temos vindo a estudar, preferencialmente fora do contexto mineiro, mas que apresentasse a característica comum de possuir dois locais onde se formassem alternativamente filas de espera.

A ideia seria a de desenvolver um estudo que nos permitisse procurar fenómenos não esperados, que apresentassem alguma semelhança com aqueles que foram por nós detectados, e que consequentemente permitissem algum tipo de generalização.

Um objectivo de longo prazo

De regresso ao nosso modelo, um desenvolvimento importante seria o da sua definição formal por meio da implementação de um modelo matemático de equações diferenciais estocásticas. Tratar-se-ia naturalmente de uma árdua tarefa, mas que certamente se traduziria num passo fundamental para tentar averiguar onde, nas

equações, se encontrariam as explicações para o aparecimento dos fenómenos não expectáveis que foram sendo detectados ao longo do presente trabalho.

... Bastaria não perder a paciência, o que não tarda a acontecer. O senhor Palomar afasta-se pela praia fora, com os nervos tão tensos como quando chegara, e ainda mais inseguro acerca de tudo.”

Italo Calvino (1983)⁶

⁶*in* Calvino, I., 1985, “Palomar - leitura de uma onda”, Editorial Teorema – Lisboa – Portugal.

Apêndice A

Listagem do programa

Programa ALJP0302 - DIMITOLVA_140797(input,output)

```

{USES winCRT;}

procedure vaiparaxy(x,y: integer);

begin
    {gotoxy(x,y);}
end;

const
    nmaxdump_mais_pas = 28;
    xgamamax = 34;

type
    varbiindex=array[1..nmaxdump_mais_pas,1..7] of double;

VAR
    semente:longint;
    r:char;
    mediap,modap,desviop,errop:double;
    ip,jp,nmax,nacav:integer;
    alfagama,betagama,
    Kp,tesquerdagama,tdireitagama,
    t_do_maximo_gama,f_de_tmaximo_gama :varbiindex;
    alfaweibull,betaweibull:array[0..1] of double;
    gaussb:array[1..nmaxdump_mais_pas,1..7] of boolean;

    A,AA,AE,AI,AT,AV,AD,AC,BA,BB,BRITADOR:LONGINT;
    NUMTOLVA:INTEGER;
    tolva:integer;
    DESC,I,III,H,HH,HHH,ZI,ZK,ZZI,K,IA,IC,II,IV,ND,NP:LONGINT;
    INDREL,INDIGER,N_T_ENCRAV,CONTVERDAD,NPEQINT:LONGINT;
    VALORGERADO,CST,CIT,CT,TR,TTB,MT,TEB,ME,VDB:DOUBLE;
    INDCST:DOUBLE;
    DCTV,DT,TEREF,TFR,X,XX,XXX,T,S,PSANA,CTANA,CTANT:DOUBLE;
    PRODIA,STETSC,STPA,STFP,STFB,STTB,STEB,STECS,TTESPERA:DOUBLE;
    TMMP,CMP:DOUBLE;
    REF:CHAR;
    STSC,SFP,SPA,SFB,SPR:DOUBLE;
    S2TSC,S2FP,S2PA,S2FB,S2PR:DOUBLE;
    SMTETSC,SMEDFP,SMEDPA,SMEDFB,SMEDPR:DOUBLE;
    MEDTSC,MEDFP,MEDPA,MEDFB,MEDPR:DOUBLE;
    MTSC,MFP,MPA,MFB,MPR:DOUBLE;
    M2SC,M2FP,M2PA,M2FB,M2PR:DOUBLE;
    DP_TSC,DP_FP,DP_PA,DP_FB,DP_CS,DP_DE,DP_PR:DOUBLE;
    PSCL,INDC:DOUBLE;
    psclinput,numaxrel,catolva:double;

TYPE
    INDEX = ARRAY [1..60] OF DOUBLE;
    INDEXIN = ARRAY [1..60] OF INTEGER;
    INDEXTV = ARRAY [1..60] OF LONGINT;

VAR
    CLNT:INDEXTV;
    smncl,medncl,sncl,s2mncl,mnt,m2nt,dp_nt:INDEX;
    CP,CD,TA,TC,TP,TB,TD,MA,MC,MP,MB,MD,TEP,Z,TMC:INDEX;
    TMUPA,DPUPA,TMCA,TMA,DPA,TMI,DPI,TMV,DPV,TMD,DPD:INDEX;
    BR,BV,P,FP,FB:INDEXIN;
    STEPA,STAFP,STEFB,TFAPA:INDEX;

```

```

ALFAAR, BETAAR: INDEX;
VALCUM, CLASSE: INDEX;
ALFACA, BETACA, ALFAI, BETAI, ALFAD, BETAD, ALFAV, BETAV: INDEX;
ALFAWBL, BETAWBL: DOUBLE;
INFB: INDEXIN;
MEDINFB, MINFB, STINFB, S2TINFB, M2INFB, DP_INFB, SMINFB: INDEX;

VAR
  fichdout: string[60];
  fichtout: string[60];
  FILAIN: TEXT;
  NOMEIN: STRING[60];
  FILAOUT: TEXT;
  NOMEOUT: STRING[60];
  FILANTV: TEXT;
  NOMETV: STRING[60];
  IMAGPEDREI: CHAR;
  filprod: TEXT;
  nomeprod: string[60];

VAR
  PONTEIRO, SUM, MEDIA, DESVPAD, OBSERVA, MODA: DOUBLE;
  IIII, NUMCLASS, INDICA: INTEGER;

function ModestWholeNumber (X: double): boolean;

  {Returns true iff X is a whole number in the range - maxint .. maxint.}

begin
  if abs (X) < maxint then ModestWholeNumber := X = trunc (X)
  else
    ModestWholeNumber:=false
end;

function IntPow (Base: double; NonNegInt: integer): double;

{Returns Base raised to the nonnegative integer power NonNegInt.}

begin
  if NonNegInt = 0 then IntPow := 1
  else
    if odd (NonNegInt) then IntPow := Base * IntPow (Base, NonNegInt - 1)
    else
      IntPow := sqr (IntPow (Base, NonNegInt div 2));
end;

function POW (Base, Exponent: double): double;

{Returns Base raised to the Exponent power.
Prerequisite files: EvenReal.lib, IntPow.lib,}

begin
  if Exponent < 0.0 then POW := 1.0 / POW (Base, -Exponent)
  else
    if (Base = 1.0) or (Exponent = 0.0) then POW := 1.0

    {:assuming POW (0.0, 0.0) = 1.0}

    else
      if Base = 0.0 then POW := 0.0
      else

```



```

    if ModestWholeNumber (Exponent) then
      POW := IntPow (Base, trunc (Exponent))
    else
      POW := exp (Exponent * ln (Base));
end;

function normalaleat(m,sd:double):double;

{gerador de numeros aleatorios, distribuidos normalmente,
 média m, desvio padrão sd; gera um aleatorio de cada vez
 que e chamada a função}

const
  nuniforme=40;

var
  i,j:integer;
  aux,k:double;

begin
  k:=sqrt(3)/0.5; {porque o desvio padrão da distribuição
                  uniforme e 0.5/sqrt(3) }
  aux:=0;
  for j:=1 to nuniforme do aux:=aux+(0.5-random)*k;
  aux:=aux/nuniforme*sqrt(nuniforme);

  {neste ponto aux e um aleatorio aprox normal, com média zero e
   desvio padrão unitario}

  normalaleat:=aux*sd+m;

  {x e um aleatorio aprox. normal, com média m e desvio padrão sd}

end;

function F(Xf,alfaf,betaf,kapaf:double):double;

  {distribuição de probabilidade}

begin
  F:= POW(xf, (alfaf-1)) *exp(-xf/betaf) *Kapaf    {Distribuição gama}

end;

function geragama(Moivre:boolean;alfag,betag,kapag,tesquerdag,
                  tdireitag,f_de_tmaximog:double):double;

  {gerador de aleatorios Von Newmann, gerando aleatorios da lei gama}

var
  erro,xr,yr,yc,t_do_maximo,f_de_tmaximo:double;
  marca:boolean;

begin
  if Moivre then
    geragama:= normalaleat((alfag*betag),(sqrt(alfag)*betag))
  else
    repeat
      marca:=false;

```

```

{inicio do gerador de aleatorios, pelo metodo de VON NEUWMANN}

xr:=tesquerdag+random*(tdireitag-tesquerdag);
yc:=f(xr,alfag,betag,kapag);
yr:=random*f_de_tmaximog;
if yr<yc then
begin
    marca:=true;
    geragama:=xr;
end;
until marca;
end;

function gama(xg:double):double;

{TABLES OF HIGHER FUNCTIONS - JAHNKE EMDE LOSCH - MACGRAW-HILL p4,
paragrafo 1.1 primeira expressão com produtorio; produtorio de
convergencia lenta; deve ser usada dupla precisão }

const NCICLOS=10000;

var
    E5, Z,ZI,P1,P2:double;
    I:INTEGER;

begin
    E5:=1E-3;
    ZI:=xg;
    if zi>171 then
    begin
        writeln('PARA EVITAR OVERFLOW PARO!');
        writeln('Z>171');
        HALT;
    end;
    Z:=ZI-1;
    P1:=1;
    P2:=Z;
    while Z>2 do
    begin
        Z:=Z-1;
        P2:=P2*Z;
    end;
    for I:=1 to NCICLOS do
    begin
        P1:=P1*POW((1+1/I),Z)*1/(1+Z/I);
    end;
    gama:=p2*p1/z;
    vaiparaxy(5,20);
end;

function kapa(alfak,betak:double):double;

begin
    Kapa:=(POW(betak, (-1*alfak)))/gama(alfak);
end;

procedure CAS01(VAR FA,A1,A2,A3,A4:double);

begin
    A4:=A3;A3:=A2;A2:=A1+(A4-A1)*FA;
end;

```

```

procedure CASO2 (VAR FA,A1,A2,A3,A4:double);

begin
    A1:=A2;A2:=A3;A3:=A4-(A4-A1)*FA;
end;

procedure SAUREA (A,B,ERRO,alfagama,betagama,kp:double;VAR maximo:double);

var
    FA,A1,A2,A3,A4:double;
    contador:integer;

begin
    contador:=0;
    FA:=0.3819661;
    A1:=A;A4:=B;
    A2:=A1+(A4-A1)*FA;
    A3:=A4-(A4-A1)*FA;
    while((ABS(A1-A4)>ERRO) and (contador<1001)) do

        begin
            contador:=contador+1;
            {if contador=1000 then writeln(' !!!ATENCAO  CONTADOR = 1000!!!');}
            if F(A2,alfagama,betagama,kp)>F(A3,alfagama,betagama,kp) then CASO1(FA,A1,A2,A3,A4)
            else
                CASO2(FA,A1,A2,A3,A4);
        end;
        maximo:=(A4+A1)/2;
    end;

function gerweibull(n_estado:integer):double;

var
    r:double;

begin
    r:=1-random;
    gerweibull:=betaweibull[n_estado]*pow((-ln(r)),1/alfaweibull[n_estado])
end;

function gergama(N_MAQUINA,N_TAREFA:integer):double;

begin

    {writeln('#####',n_tarefa, n_maquina,'#####');}

    gergama:=geragama(gaussb[n_tarefa,n_maquina],alfagama[n_tarefa,n_maquina],
        betagama[n_tarefa,n_maquina],kp[n_tarefa,n_maquina],
        tesquerdagama[n_tarefa,n_maquina],tdireitagama[n_tarefa,n_maquina],
        f_de_tmaximo_gama[n_tarefa,n_maquina]);
end;

PROCEDURE SIMETRIA; {Análise da simetria dos histogramas de frequências
                    de níveis}

BEGIN

{Determinar o nº de classes que vão fazer parte do histograma}

    BEGIN

        PONTEIRO:=CIT;

```

```

        IIII:=0;

        REPEAT

        BEGIN
            PONTEIRO:=PONTEIRO+PSCL;
            IIII:=IIII+1;
        END

        UNTIL

        PONTEIRO>=INDCST;

        NUMCLASS:=IIII;
    END;

{Determina a média dos valores de frequência de níveis}

    BEGIN

        SUM:=0;

        FOR I:=1 TO NUMCLASS DO

        BEGIN
            SUM:=SUM+MNT[I];
        END;

        MEDIA:=SUM/NUMCLASS;

    END;

{Determina o Desvio Padrão dos valores de frequência de níveis}

    BEGIN

        SUM:=0;

        FOR I:=1 TO NUMCLASS DO

        BEGIN
            SUM:=SUM+((MNT[I]-MEDIA)*(MNT[I]-MEDIA));
        END;

        DESVPAD:=SQRT(SUM/NUMCLASS);

    END;

{Determina a Moda dos valores de frequência de níveis}

    BEGIN

        OBSERVA:=MNT[1];
        INDICA:=1;

        FOR I:=1 TO NUMCLASS DO

        BEGIN

            IF OBSERVA < MNT[I+1] THEN

            BEGIN

```

```

        OBSERVA:=MNT[I+1];
        INDICA:=I+1;
    END;

END;

MODA:=(CIT+INDICA*PSCL)-(PSCL/2);

END;

END;

PROCEDURE NIVEL;

BEGIN

    FOR I:=1 TO (52) DO {prudencia 52 = Cap. tolva/0.58}
    BEGIN
        CLNT[I]:=0;
    END;
END;

PROCEDURE GERENCRAV;

BEGIN
    {Gera tempos de encravamento do britador}
    VALORGERADO:=RANDOM;          {usando um histograma empirico}
    HHH:=1;
    BEGIN
        WHILE VALORGERADO>VALCUM[HHH] DO
        BEGIN
            HHH:=HHH+1;
        END;
    END;
    IF VALORGERADO=VALCUM[HHH] THEN
    BEGIN
        X:=CLASSE[HHH];
    END
    ELSE
    BEGIN
        XX:=(CLASSE[HHH]-CLASSE[HHH-1])*(VALORGERADO-VALCUM[HHH-1]);
        XXX:=XX/(VALCUM[HHH]-VALCUM[HHH-1]);
        X:=CLASSE[HHH-1]+XXX;
    END;
END;

PROCEDURE IMAGEM;

BEGIN

    {
    REPEAT
    UNTIL KEYPRESSED;
    REF:=READKEY;

    vaiparaxy(1,1);
    FOR I:=1 TO NP DO
    BEGIN
        WRITE(' P (' ,I,' )=' ,P[I], ' ');
    END;
    FOR I:=1 TO ND DO
    BEGIN
        vaiparaxy(3,I+3);
    }

```

```

        WRITELN('FP(' , I, ')=' , FP[I]);
END;
FOR I:=ND DOWNT0 1 DO
BEGIN
    vaiparaxy(53, (ND-I)+5);
    WRITELN('BV(' , I, ')=' , BV[I]);
END;

FOR I:=ND DOWNT0 1 DO
BEGIN
    vaiparaxy(39, (ND-I)+11);
    WRITELN('FB(' , I, ')=' , FB[I]);
END;
FOR I:=1 TO ND DO
BEGIN
    vaiparaxy(18, I+6);
    WRITELN('BR(' , I, ')=' , BR[I]);
END;
vaiparaxy(26, I+11);
WRITELN('BB = ' , BB);
vaiparaxy(3, I+12);
WRITELN('Tolva = ' , CT:5:3);
vaiparaxy(23, I+13);
WRITELN('Brit. = ' , BRITADOR);
BEGIN
    IF BRITADOR=1 THEN
    BEGIN
        vaiparaxy(17, I+15);
        WRITELN('Temp. Trab. = ' , TTB:5:3);
    END
    ELSE
    BEGIN
        vaiparaxy(17, I+15);
        WRITELN('Temp. Encl. = ' , TEB:5:3);
    END;
END;
vaiparaxy(3, I+11);
WRITELN('C S --> ' , INDCST:4:2);
vaiparaxy(3, I+13);
WRITELN('C I --> ' , CIT:4:2);
vaiparaxy(57, 1);
WRITELN('TR = ' , TR:8:3, ' ');
vaiparaxy(57, 2);
WRITELN('Fim Releva = ' , TFR:4:1);

IF DT<0 THEN
BEGIN

    vaiparaxy(3, I+15);
    HH:=HH+1;
    WRITELN('          ');
    vaiparaxy(3, I+15);
    WRITELN('** ' , HH, ' **');
END;
vaiparaxy(55, I+11);
WRITELN('A = ' , A);
vaiparaxy(55, I+12);
WRITELN('          ');
vaiparaxy(55, I+13);
WRITELN('          ');
vaiparaxy(55, I+12);
CASE A OF

```

```

1: BEGIN
  WRITELN('Arrumação - Pá nž',IA);
  vaiparaxy(55,I+13);
  WRITELN('(',DT:4:3,')');
  END;
2: BEGIN
  WRITELN('Carga - Camião nž',P[IC]);
  vaiparaxy(55,I+13);
  WRITELN('(',DT:4:3,')');
  END;
3: BEGIN
  WRITELN('Ida - Camião nž',BV[1]);
  vaiparaxy(55,I+13);
  WRITELN('(',DT:4:3,')');
  END;
4: BEGIN
  WRITELN('Descarga - Camião nž',BB);
  vaiparaxy(55,I+13);
  WRITELN('(',DT:4:3,')');
  END;
5: BEGIN
  WRITELN('Regresso - Camião nž',BR[1]);
  vaiparaxy(55,I+13);
  WRITELN('(',DT:4:3,')');
  END;
6: BEGIN
  WRITELN('Trabalho - Britador');
  vaiparaxy(55,I+13);
  WRITELN('(',DT:4:3,')');
  END;
7: BEGIN
  WRITELN('Encravamento- Britador');
  vaiparaxy(55,I+13);
  WRITELN('(',DT:4:3,')');
  END;
END;

vaiparaxy(55,I+15);
WRITE('RELEVO N -> ',INDREL);
}
END;

PROCEDURE ARRGER;

BEGIN

  FOR I:=1 TO NP DO
  BEGIN
    ALFAAR[I]:=TMA[I]*TMA[I]/(DPA[I]*DPA[I]);
    BETAAR[I]:=TMA[I]/ALFAAR[I];
    ALFACA[I]:=TMUPA[I]*TMUPA[I]/(DPUPA[I]*DPUPA[I]);
    BETACA[I]:=TMUPA[I]/ALFACA[I];
  END;

  {Determina alfa e beta da Gamma para os tempos dos camiões}

  FOR I:=1 TO ND DO
  BEGIN
    ALFAI[I]:=TMI[I]*TMI[I]/(DPI[I]*DPI[I]);
    BETAI[I]:=TMI[I]/ALFAI[I];
    ALFAD[I]:=TMD[I]*TMD[I]/(DPD[I]*DPD[I]);
    BETAD[I]:=TMD[I]/ALFAD[I];
  END;

```

```

        ALFAV[I]:=TMV[I]*TMV[I]/(DPV[I]*DPV[I]);
        BETAV[I]:=TMV[I]/ALFAV[I];
    END;

    {Determina alfa e beta da Gamma para o tempo de arrumação das pás}

END;

PROCEDURE ACUMULADOR;

BEGIN
    INDC:=CIT;
    III:=0;

    REPEAT

    BEGIN
        INDC:=INDC+PSCL;
        III:=III+1;
    END
    UNTIL

    CTANA<=INDC;

    CLNT[III]:=CLNT[III]+1;

END;

PROCEDURE AUMENTO;

BEGIN

    TR:=TR+DT;          {Incremento do relógio principal}

    {IF IMAGPEDREI='N' THEN

    BEGIN
        vaiparaxy(5,9);
        WRITE('TEMPO REAL TR -> ',TR:8:3);
    END;}

    IF TR<TFR THEN

    BEGIN

    {Integradora dos tempos de espera da tolva sem caminhão para descarregar}

        IF (BB=0) AND (FB[1]=0) THEN

        BEGIN
            STETSC:=STETSC+DT;
        END;

    {Integradoras dos tempos de espera das pás}

    BEGIN
        FOR I:=1 TO NP DO
        BEGIN
            IF P[I]=0 THEN
            BEGIN
                STEPA[I]:=STEPSA[I]+DT;
            END;
        END;
    END;

```



```

        END;
    END;

{Integradoras dos tempos de espera dos camiões na fila das pás}

    BEGIN
        FOR I:=1 TO ND DO
            BEGIN
                IF FP[I]<>0 THEN
                    BEGIN
                        STEFP[FP[I]]:=STEFP[FP[I]]+DT;
                    END;
                END;
            END;
        END;

{Integradoras dos tempos de espera dos camiões na fila do britador}

    BEGIN
        FOR I:=1 TO ND DO
            BEGIN
                IF FB[I]<>0 THEN {Análise da ocupação da fila do britador}
                    BEGIN
                        INFB[I]:=INFB[I]+1;
                    END;
                BEGIN
                    IF FB[I]<>0 THEN
                        BEGIN
                            STEFB[FB[I]]:=STEFB[FB[I]]+DT;
                            IF (I=1) AND (BB=0) AND (CD[FB[1]]>(INDCST-CT)) THEN
                                BEGIN
                                    STECS:=STECS+DT; {Integradora do tempo de espera}
                                                                {na fila do britador pelo facto}
                                                                {de a tolva estar cheia}
                                END;
                            END;
                        END;
                    END;
                END;
            END;
        END;

        FOR I:=1 TO NP DO
            BEGIN
                IF P[I]=0 THEN
                    BEGIN
                        TEP[I]:=TEP[I]+DT; {Aumenta o tempo de espera das pás}
                    END
                ELSE
                    BEGIN
                        IF P[I]=-1 THEN
                            BEGIN
                                TA[I]:=TA[I]-DT; {Diminui o tempo de arrumação}
                                IF TA[I]<0 THEN TA[I]:=0;
                            END
                        ELSE
                            BEGIN
                                TC[P[I]]:=TC[P[I]]-DT; {Diminui o tempo de carga}
                                IF TC[P[I]]<0 THEN TC[P[I]]:=0;
                            END;
                        END;
                    END;
                END;
            END;
        END;
        FOR I:=1 TO ND DO
            BEGIN
                IF BV[I]<>0 THEN
                    BEGIN
                        TP[BV[I]]:=TP[BV[I]]-DT; {Diminui o tempo de ida}
                    END;
                END;
            END;
        END;
    END;

```

```

        IF TP[BV[I]]<0 THEN TP[BV[I]]:=0;
    END;
END;
BEGIN
    IF BB<>0 THEN
        BEGIN
            TD[BB]:=TD[BB]-DT;          {Diminui o tempo de descarga}
            IF TD[BB]<0 THEN TD[BB]:=0;
        END;
    END;
    FOR I:=1 TO ND DO
        BEGIN
            IF BR[I]<>0 THEN
                BEGIN
                    TB[BR[I]]:=TB[BR[I]]-DT;    {Diminui o tempo de regresso}
                    IF TB[BR[I]]<0 THEN TB[BR[I]]:=0;
                END;
            END;
        END;

        BEGIN
            IF BRITADOR=0 THEN
                BEGIN
                    TEB:=TEB-DT;          {Diminui o tempo de encravamento}
                    IF TEB<0 THEN TEB:=0;
                END
            ELSE
                BEGIN
                    TTB:=TTB-DT;          {Diminui o tempo de trabalho}
                    IF TTB<0 THEN TTB:=0;
                END;
            END;
        END;

        CTANT:=CT;

        BEGIN
            IF (BRITADOR=1) AND (CT>CIT) THEN
                BEGIN
                    DCTV:=CT-(DT*VDB);
                    IF DCTV<CIT THEN
                        BEGIN
                            PRODIA:=PRODIA+(DT*VDB-(ABS(DCTV-CIT)));
                            CT:=CIT;          {0 britador descarrega}
                        END
                    ELSE
                        BEGIN
                            PRODIA:=PRODIA+(DT*VDB);
                            CT:=DCTV;          {0 britador descarrega}
                        END;
                    END;
                END;
            END;

            IF PSANA<DT THEN          {Analise do Nivel da Tolva}
                BEGIN
                    CTANA:=CTANT;
                    NPEQINT:=TRUNC(DT/PSANA);
                    IF (CTANT-CT)<0 THEN
                        BEGIN
                            FOR I:=1 TO NPEQINT DO
                                BEGIN
                                    CTANA:=CTANA+ ((ABS(CTANT-CT)*PSANA)/DT);
                                    ACUMULADOR;
                                END;
                            END;
                        END;
                    END;
                END;
            END;
        END;
    END;
END;

```

```

        END;
    END;
    IF (CTANT-CT)=0 THEN
    BEGIN
        FOR I:=1 TO NPEQINT DO
        BEGIN
            ACUMULADOR;
        END;
    END;
    IF (CTANT-CT)>0 THEN
    BEGIN
        FOR I:=1 TO NPEQINT DO
        BEGIN
            CTANA:=CTANA- ( (ABS (CTANT-CT) *PSANA) /DT) ;
            ACUMULADOR;
        END;
    END;
END;
END;
END;
END;

PROCEDURE RAPIDO;

BEGIN
    {clrscr;}

    {Nome do ficheiro de entrada de dados}

    NOMEIN:='k:\simulação\pedreiral\Dados1.run'; {novo nome do ficheiro dados.run}
    {
    WRITELN;
    WRITELN('Nome do ficheiro de entrada de dados = ');WRITE(NOMEIN);
    }
    ASSIGN(FILAIN,NOMEIN);
    RESET(FILAIN);

    nomeprod:='k:\simulação\pedreiral\prod\producao';
    assign(filprod,nomeprod);rewrite(filprod);

    {Leitura de dados de inicialização}

    READLN(FILAIN,semente);          {Variavel inicializadora do random}
    READLN(FILAIN,PSANA);
    readln(filain,psclinput);
    readln(filain,numaxrel);
    readln(filain,catolva);
    READLN(FILAIN,CST);
    READLN(FILAIN,CIT);
    READLN(FILAIN,VDB);
    READLN(FILAIN,NP);
    READLN(FILAIN,ND);
    readln(filain,fichdout);
    readln(filain,fichtout);
    READLN(FILAIN,TFR);
    BEGIN
        TMMP:=0;                      {tempo médio de manobra}
        CMP:=0;                       {capacidade média das pás}
        FOR I:=1 TO NP DO
        BEGIN
            READLN(FILAIN,CP[I]);      {capacidade da pá}
            CMP:=CMP+CP[I];
            READLN(FILAIN,TMA[I]);

```

```

        READLN(FILAIN,DPA[I]);
        READLN(FILAIN,TMUPA[I]);      {tempo médio unitário manobra da pá}
        TMUPA[I]:=TMUPA[I];
        TMMP:=TMMP+TMUPA[I];
        READLN(FILAIN,DPUPA[I]);      {DP de tempo médio unitário manobra da pá}
        DPUPA[I]:=DPUPA[I];
    END;
    TMMP:=TMMP/I;                      {tempo médio de manobra das pás}
    CMP:=CMP/I;                        {capacidade média das pás}
    FOR I:=1 TO ND DO
    BEGIN
        READLN(FILAIN,CD[I]);
        READLN(FILAIN,TMI[I]);
        TMI[I]:=TMI[I];
        READLN(FILAIN,DPI[I]);
        DPI[I]:=DPI[I];
        READLN(FILAIN,TMV[I]);
        TMV[I]:=TMV[I];
        READLN(FILAIN,DPV[I]);
        DPV[I]:=DPV[I];
        READLN(FILAIN,TMD[I]);
        TMD[I]:=TMD[I];
        READLN(FILAIN,DPD[I]);
        DPD[I]:=DPD[I];
    END;
    READLN(FILAIN,ALFAWBL);
    READLN(FILAIN,BETAWBL);

    READLN(FILAIN,N_T_ENCRAV);

    FOR HHH:=1 TO N_T_ENCRAV DO
    BEGIN
        READ(FILAIN,VALCUM[HHH]);
        READLN(FILAIN,CLASSE[HHH]);
    END;
END;

ARRGER;

END;

PROCEDURE FINALIZAR;

BEGIN

{Contas finais}

    BEGIN
        FOR I:=1 TO NP DO
        BEGIN

{Tempo total de espera das pás}

            STPA:=STPA+STPEA[I];
        END;
        FOR I:=1 TO ND DO
        BEGIN

{Tempo total de espera na fila das pás}

            STFP:=STFP+STFEP[I];

```

```

{Tempo total de espera na fila do britador}

        STFB:=STFB+STFB[I];
        END;
    END;

    TTESPERA:=STFP+STPA+STFB;          {Tempo total de esperas}

    FOR I:=1 TO NP DO
    BEGIN
        IF P[I]=-1 THEN
        BEGIN
            TFAPA[I]:=TMA[I];          {Tempo em falta para arrumação}
            END;                        {das pás em arrumação}
        END;                            {-----> novo relevo}

        {clrscr;}

    END;

PROCEDURE AZERAR;

    BEGIN

{Azerar tudo}

        FOR I:=1 TO NP DO
        BEGIN
            MA[I]:=0;TA[I]:=0;STPA[I]:=0;
        END;
        FOR I:=1 TO ND DO
        BEGIN
            MC[I]:=0;TC[I]:=0;
            MP[I]:=0;TP[I]:=0;
            MB[I]:=0;TB[I]:=0;
            MD[I]:=0;TD[I]:=0;STFP[I]:=0;STFB[I]:=0;
            INFB[I]:=0;
        END;

        FOR I:=1 TO ND+1 DO
        BEGIN
            BV[I]:=0; FB[I]:=0; BR[I]:=0; FP[I]:=0;
        END;

        A:=0; BB:=0; AA:=-1; AC:=-1; AI:=-1; AV:=-1; AD:=-1;
        HH:=0;AT:=-1;AE:=-1;
        STPA:=0;STFP:=0;STFB:=0;STTB:=0;STEB:=0;PRODIA:=0;
        DESC:=0;STECs:=0;STETSC:=0;

{A tolva adquire a capacidade mínima}

        CT:=CIT;

{O relógio vai a zero}

        TR:=0; DT:=0;

{Os camiões vão para a fila das pás}

        FOR I:= 1 TO ND DO
        BEGIN
            FP[I]:=I;

```

```

        END;

    END;

PROCEDURE PRIMEIROS_TEMPOS;

BEGIN

    {Gerar o primeiro tempo de trabalho do britador}

    BRITADOR:=1;          {O britador adquire índice de trabalho}
    X:=gerweibull(1);
    TTB:=X;
    STTB:=STTB+TTB;

    {Gerar os primeiros tempos de arrumação das pás}

    FOR I:=1 TO NP DO
    BEGIN
        P[I]:=-1;          {As pás adquirem índice de arrumação}
        INDIGER:=1;
        X:=gergama(INDIGER,I);
        TA[I]:=X;
    END;
END;

{INICIO DO RELEVO}

BEGIN

    {clrscr;

    REPEAT
    WRITE ('Vou iniciar a corrida. Quer Imagem (S/N) ?');
    READLN(IMAGPEDREI);
    UNTIL (IMAGPEDREI='S') OR (IMAGPEDREI='N');
    }
    IMAGPEDREI:= 'N';

    BEGIN
        RAPIDO;
    END;

    {Inicialização das distribuições e azerar}

    BEGIN

    {Calcula os tempos médios de um ciclo dos camiões}

    FOR I:=1 TO ND DO
    BEGIN
        TMCA[I]:=(CD[I]/CMP)*TMMP;          {Tempo médio de carga dos camiões}
    END;                                     {TMMP - tempo médio de manobra - pás}
                                           {CMP - capacidade média das pás}

    FOR I:=1 TO ND DO
    BEGIN
        TMC[I]:=TMCA[I]+TMI[I]+TMV[I]+TMD[I]; {Tempo médio de ciclo de cada camião}
    END;

    AZERAR;

```

```

ERROp:=1e-5;
RandSeed:=semente;  {Inicialização do gerador de aleatorios}

{Inicio do bloco referente aos dumpers; os dumpers so tem
tarefas 3,4,5 correspondentes a carga,ida, descarga, regresso}

for ip:=1 to ND do
begin
  {clrscr;
  vaiparaxy(5,5);
  write('Estou a inicializar as distribuições "GAMMA" do camião nº ',ip);
  }

  for jp:=3 to 5 do
  begin
    if jp=3 then alfagama[ip,jp]:=alfai[ip];
    if jp=4 then alfagama[ip,jp]:=alfad[ip];
    if jp=5 then alfagama[ip,jp]:=alfav[ip];
    if jp=3 then betagama[ip,jp]:=betai[ip];
    if jp=4 then betagama[ip,jp]:=betad[ip];
    if jp=5 then betagama[ip,jp]:=betav[ip];
    mediap:= alfagama[ip,jp]*betagama[ip,jp];
    desviop:=sqrt(alfagama[ip,jp])*betagama[ip,jp];
    {vaiparaxy(5,15);write('Média = ',mediap:8:3);
    vaiparaxy(5,16);write('Desv.Padr. = ',desviop:8:3);
    vaiparaxy(35,15);write('Alfa = ',alfagama[ip,jp]:8:4);
    vaiparaxy(35,16);write('Beta = ',betagama[ip,jp]:8:4);
    vaiparaxy(5,12);}
    {
    if jp=3 then write('Ida');
    if jp=4 then write('Descarga');
    if jp=5 then write('Regresso');
    }
    if alfagama[ip,jp]<xgamamax then
    begin
      gaussb[ip,jp]:=false;
      {
      vaiparaxy(5,9);write('');
      vaiparaxy(5,9);write('Estou a calcular Gama(alfa)');
      }
      Kp[ip,jp]:=kapa(alfagama[ip,jp],betagama[ip,jp]);
      tesquerdagama[ip,jp]:=mediap-6*desviop;
      if tesquerdagama[ip,jp]<0 then tesquerdagama[ip,jp]:=0;
      tdireitagama[ip,jp]:=mediap+6*desviop;
      SAUREA(tesquerdagama[ip,jp],tdireitagama[ip,jp],ERROp,alfagama[ip,jp],
      betagama[ip,jp], kp[ip,jp],t_do_maximo_gama[ip,jp]);
      f_de_tmaximo_gama[ip,jp]:=f(t_do_maximo_gama[ip,jp],alfagama[ip,jp],betagama[ip,jp],kp[ip,jp]);
    end
    else
    begin
      gaussb[ip,jp]:=true;
      {vaiparaxy(5,9);
      write('');
      vaiparaxy(5,9);write('Estou a calcular Gauss em vez de Gama(alfa)');
      }
      modap:=(alfagama[ip,jp]-1)*betagama[ip,jp];
      if abs(modap-mediap)/mediap>0.2 then
      {write('mas pode haver problemas com esta distribuição !!!!');}
    end;
  end;
end;

end;
end;

```

```

{Fim do bloco referente aos dumpers}

{Inicio do bloco referente as pas; as pas so tem tarefas 1 e 2}

for ip:=1 to NP do
begin
  {clrscr;
  vaiparaxy(5,5);
  write('Estou a inicializar a distribuição "GAMA" da pá nº ',ip);
  }
  jp:=1; (* o diabo e sendeiro *)
  alfagama[ip,jp]:=alfaar[ip];
  betagama[ip,jp]:=betaar[ip];
  mediap:= alfagama[ip,jp]*betagama[ip,jp];
  desviop:=sqrt(alfagama[ip,jp])*betagama[ip,jp];
  {vaiparaxy(5,12);write('Arrumação');
  vaiparaxy(5,15);write('Média = ',mediap:8:3);
  vaiparaxy(5,16);write('Desv.Padr. = ',desviop:8:3);
  vaiparaxy(35,15);write('Alfa = ',alfagama[ip,jp]:8:4);
  vaiparaxy(35,16);write('Beta = ',betagama[ip,jp]:8:4);
  }
  if alfagama[ip,jp]<xgamamax then
  begin
    gaussb[ip,jp]:=false;
    {vaiparaxy(5,9);write('Estou a calcular Gama(alfa)');}
    Kp[ip,jp]:=kapa(alfagama[ip,jp],betagama[ip,jp]);
    tesquerdagama[ip,jp]:=mediap-6*desviop;
    if tesquerdagama[ip,jp]<0 then tesquerdagama[ip,jp]:=0;
    tdireitagama[ip,jp]:=mediap+6*desviop;
    SAUREA(tesquerdagama[ip,jp],tdireitagama[ip,jp],ERROp,alfagama[ip,jp],
    betagama[ip,jp], kp[ip,jp],t_do_maximo_gama[ip,jp]);
    f_de_tmaximo_gama[ip,jp]:=f(t_do_maximo_gama[ip,jp],alfagama[ip,jp],betagama[ip,jp],kp[ip,jp]);
  end
  else
  begin
    gaussb[ip,jp]:=true;
    {vaiparaxy(5,9);
    write('
    ');
    vaiparaxy(5,9);write('Estou a calcular Gauss em vez de Gama(alfa)');
    vaiparaxy(5,12);write('Arrumação');
    }
    modap:=(alfagama[ip,jp]-1)*betagama[ip,jp];
    {
    if abs(modap-mediap)/mediap>0.2 then
    write('mas pode haver problemas com esta distribuição !!!!');
    }
  end;
end;

for ip:=1 to NP do
begin
  {clrscr;
  vaiparaxy(5,5);
  write('Estou a inicializar a distribuição "GAMA" da pá nº ',ip);
  }
  jp:=2; (* o diabo é sendeiro *)
  alfagama[ip,jp]:=alfaca[ip];
  betagama[ip,jp]:=betaca[ip];
  mediap:= alfagama[ip,jp]*betagama[ip,jp];
  desviop:=sqrt(alfagama[ip,jp])*betagama[ip,jp];
  {

```



```

    vaiparaxy(5,12);write('Manobra');
    vaiparaxy(5,15);write('Média = ',mediap:8:3);
    vaiparaxy(5,16);write('Desv.Padr. = ',desviop:8:3);
    vaiparaxy(35,15);write('Alfa = ',alfagama[ip,jp]:8:4);
    vaiparaxy(35,16);write('Beta = ',betagama[ip,jp]:8:4);
  }
  if alfagama[ip,jp]<xgamamax then
  begin
    gaussb[ip,jp]:=false;
    {vaiparaxy(5,9);write('Estou a calcular Gama(alfa)');}
    Kp[ip,jp]:=kapa(alfagama[ip,jp],betagama[ip,jp]);
    tesquerdagama[ip,jp]:=mediap-6*desviop;
    if tesquerdagama[ip,jp]<0 then tesquerdagama[ip,jp]:=0;
    tdireitagama[ip,jp]:=mediap+6*desviop;
    SAUREA(tesquerdagama[ip,jp],tdireitagama[ip,jp],ERROp,alfagama[ip,jp],
    betagama[ip,jp], kp[ip,jp],t_do_maximo_gama[ip,jp]);
    f_de_tmaximo_gama[ip,jp]:=f(t_do_maximo_gama[ip,jp],alfagama[ip,jp],betagama[ip,jp],kp[ip,jp]);
  end
  else
  begin
    gaussb[ip,jp]:=true;
    {vaiparaxy(5,9);
    write('
    ');
    vaiparaxy(5,9);write('Estou a calcular Gauss em vez de Gama(alfa)');
    vaiparaxy(5,12);write('Manobra');
    }
    modap:=(alfagama[ip,jp]-1)*betagama[ip,jp];
    if abs(modap-mediap)/mediap>0.2 then
    {write('mas pode haver problemas com esta distribuição !!!!');}
  end;
end;

{Fim do bloco referente as pas}

{Inicio do bloco referente ao britador}

alfaweibull[1]:=alfawbl; {Estado um = britador ligado}
betaweibull[1]:=betawbl;

{Fim do bloco referente ao britador}

PRIMEIROS_TEMPOS;

END;

{clrscr;}
NOMEOUT:=fichdout;
ASSIGN(FILAOUT,NOMEOUT);REWRITE(FILAOUT);
NOMENTV:=fichtout;
ASSIGN(FILANTV,NOMENTV);REWRITE(FILANTV);

PSCL:=psclinput;

{Inicia-se o indicador do nível máximo admitido pela tolva o valor adiciondo a CIT (+/- a CAPACIDADE DE UM
CAMIÃO) destina-se a viabilizar as primeiras corridas (admitir a descarga dos camiões)}

INDCST:=(CIT+catolva);

IIII:=80; {Nº máximo de classes - exagerado}

NIVEL;

```

```

INDREL:=1;

REPEAT

BEGIN {TOLVA}

    WRITE(FILAOUT,INDCST:4:2,'      ');

    REPEAT

    BEGIN {N_RELEVOS}

        WHILE TR<TFR DO

            {ORDENACOES}

            BEGIN {RELEVO}

                BEGIN

{Se o 1º lugar da fila do britador está ocupado, se a capacidade} {disponível é superior á capacidade do camião
e se a plataforma } {de descarga está vazia ... then}

                IF (FB[1]<>0) AND (CD[FB[1]]<(INDCST-CT)) AND (BB=0) THEN

                    BEGIN

{Gera tempo de descarga}

                        BB:=FB[1];
                        INDIGER:=4;
                        X:=gergama(INDIGER,BB);
                        TD[BB]:=X;

{Chega os camiões um lugar para a frente}

                        FOR I:=1 TO ND DO
                            BEGIN
                                FB[I]:=FB[I+1];
                            END;
                        END;
                    END;
                BEGIN
                    BA:=0;
                    IA:=0;
                    FOR I:=1 TO NP DO
                        BEGIN
                            IF P[I]=-1 THEN

{Mínimo tempo das arrumações}

                                BEGIN
                                    BA:=BA+1;
                                    IF BA=1 THEN
                                        BEGIN
                                            MA[I]:=TA[I];
                                            IA:=I;
                                        END
                                    ELSE
                                        BEGIN
                                            IF MA[IA]>TA[I] THEN
                                                BEGIN

```

```

                                MA[I]:=TA[I];
                                IA:=I;
                                END;
                            END;
                        END;
                    END;
                IF IA=0 THEN
                BEGIN
                    AA:=0;
                END
                ELSE
                BEGIN
                    AA:=1;
                END;
            END;
        END;

{Mínimo tempo de carga}

        BEGIN
            BA:=0;
            IC:=0;
            FOR I:=1 TO NP DO
            BEGIN
                IF (P[I]<>0) AND (P[I]<>-1) THEN
                BEGIN
                    BA:=BA+1;
                    IF BA=1 THEN
                    BEGIN
                        MC[P[I]]:=TC[P[I]];
                        IC:=I;
                    END
                    ELSE
                    BEGIN
                        IF MC[P[IC]]>TC[P[I]] THEN
                        BEGIN
                            MC[P[I]]:=TC[P[I]];
                            IC:=I;
                        END;
                    END;
                END;
            END;
        END;
        IF IC=0 THEN
        BEGIN
            AC:=0;
        END
        ELSE
        BEGIN
            AC:=1;
        END;
    END;

{Mínimo tempo de ida}

        BEGIN
            IF BV[1]<>0 THEN
            BEGIN
                MP[BV[1]]:=TP[BV[1]];
                AI:=1;
            END
            ELSE
            BEGIN
                AI:=0;
            END;
        END;
    END;

```

```

        END;
    END;

{Mínimo tempo de regresso}

    BEGIN
        IF BR[1]<>0 THEN
            BEGIN
                MB[BR[1]]:=TB[BR[1]];
                AV:=1;
            END
        ELSE
            BEGIN
                AV:=0;
            END;
        END;
    END;

{Mínimo tempo de descarga}

    BEGIN
        IF BB<>0 THEN
            BEGIN
                MD[BB]:=TD[BB];
                AD:=1
            END
        ELSE
            BEGIN
                AD:=0;
            END;
        END;
    END;

{Mínimos tempos de trabalho e encravamento do britador}

    BEGIN
        IF BRITADOR=1 THEN
            BEGIN
                MT:=TTB;
                AE:=0;
                AT:=1;
            END
        ELSE
            BEGIN
                ME:=TEB;
                AT:=0;
                AE:=1;
            END;
        END;
    END;

{DETERMINAÇÃO MÍNIMO ABSOLUTO}

    BEGIN
        A:=0;
        DT:=0;
        BEGIN
            IF (AA=1) AND (AC=1) THEN
                BEGIN
                    IF MA[IA]<MC[P[IC]] THEN
                        BEGIN
                            A:=1;
                            DT:=MA[IA];
                        END
                    ELSE

```

```

        BEGIN
            A:=2;
            DT:=MC[P[IC]];
        END;
    END
ELSE
    BEGIN
        IF (AA=0) AND (AC=1) THEN
            BEGIN
                A:=2;
                DT:=MC[P[IC]];
            END
        ELSE
            BEGIN
                IF (AA=1) AND (AC=0) THEN
                    BEGIN
                        A:=1;
                        DT:=MA[IA];
                    END;
                END;
            END;
        END;
    END;
END;

BEGIN
    IF AI=1 THEN
        BEGIN
            IF DT=0 THEN
                BEGIN
                    A:=3;
                    DT:=MP[BV[1]];
                END
            ELSE
                BEGIN
                    IF DT>MP[BV[1]] THEN
                        BEGIN
                            A:=3;
                            DT:=MP[BV[1]];
                        END;
                    END;
                END;
            END;
        END;
    END;
END;

BEGIN
    IF AD=1 THEN
        BEGIN
            IF DT=0 THEN
                BEGIN
                    A:=4;
                    DT:=MD[BB];
                END
            ELSE
                BEGIN
                    IF DT>MD[BB] THEN
                        BEGIN
                            A:=4;
                            DT:=MD[BB];
                        END;
                    END;
                END;
            END;
        END;
    END;
END;

BEGIN

```

```

IF AV=1 THEN
BEGIN
  IF DT=0 THEN
  BEGIN
    A:=5;
    DT:=MB[BR[1]];
  END
  ELSE
  BEGIN
    IF DT>MB[BR[1]] THEN
    BEGIN
      A:=5;
      DT:=MB[BR[1]];
    END;
  END;
END;
END;

BEGIN
  IF AT=1 THEN
  BEGIN
    IF DT=0 THEN
    BEGIN
      A:=6;
      DT:=MT;
    END
    ELSE
    BEGIN
      IF DT>MT THEN
      BEGIN
        A:=6;
        DT:=MT;
      END;
    END;
  END;
END;

BEGIN
  IF AE=1 THEN
  BEGIN
    IF DT=0 THEN
    BEGIN
      A:=7;
      DT:=ME;
    END
    ELSE
    BEGIN
      IF DT>ME THEN
      BEGIN
        A:=7;
        DT:=ME;
      END;
    END;
  END;
END;

END;

{IF IMAGPEDREI='S' THEN

BEGIN

```

```

        IMAGEM;

    END

    ELSE

    BEGIN

        vaiparaxy(5,5);
        WRITE('CAPACIDADE DA TOLVA -> ',INDCST:4:2);
        vaiparaxy(5,7);
        WRITE('RELEVO N -> ',INDREL);

    END;}

{TOMADA POSICOES FACE AO MINIMO}

    BEGIN

        CASE A OF

            1: BEGIN
                AUMENTO;                {de todos os tempos}

                {A pá IA vai acabar a tarefa de arrumação no tempo MA(IA)}

                P[IA]:=0;
                TEP[IA]:=0;

                {Vê se há camiões na fila das pás}

                IF FP[1]<>0 THEN
                BEGIN
                    H:=0;
                    ZI:=0;

                    {Vê qual a pá com tempo de paragem maior}

                    FOR I:=1 TO NP DO
                    BEGIN
                        IF P[I]=0 THEN
                        BEGIN
                            H:=H+1;
                            IF H=1 THEN
                            BEGIN
                                Z[I]:=TEP[I];
                                ZI:=I;
                            END
                        ELSE
                        BEGIN
                            IF Z[ZI]<=TEP[I] THEN
                            BEGIN
                                Z[I]:=TEP[I];
                                ZI:=I;
                            END;
                        END;
                    END;
                END;

                {Gera tempo de manobra}

                P[ZI]:=FP[1];    {A pá recebe um camião}

```

```

INDIGER:=2;
X:=gergama(INDIGER,ZI);
TC[P[ZI]]:=X*(CD[P[ZI]]/CP[ZI]);    {novo - tempo de carga do camião P[ZI]}

{Chega os camiões um lugar para a frente}

FOR I:=1 TO ND DO
BEGIN
    FP[I]:=FP[I+1]
END;
END;

2:    BEGIN
        AUMENTO;                {de todos os tempos}

{A pá IC vai acabar de carregar no tempo MC[P(IC)]} {Gera tempo de ida}

INDIGER:=3;
X:=gergama(INDIGER,P[IC]);
TP[P[IC]]:=X;

BEGIN
    H:=0;
    ZK:=0;
    I:=1;
    WHILE (BV[I]<>0) AND (TP[BV[I]]<TP[P[IC]]) DO
    BEGIN
        H:=H+1;
        I:=I+1;
    END;
    IF (BV[I]<>0) AND (TP[BV[I]]>=TP[P[IC]]) THEN
    BEGIN

{Coloca camião na fila de ida (local certo)}

        ZK:=ZK+1;
        ZI:=BV[I];
        BV[I]:=P[IC];
        FOR H:=I+1 TO ND DO
        BEGIN
            ZZI:=BV[H];
            BV[H]:=ZI;
            ZI:=ZZI;
        END;
    END;
    BEGIN
        IF (H=0) OR (ZK=0) THEN
        BEGIN
            BV[I]:=P[IC]
        END;
    END;

{A pá passa a ter índice de arrumação}

    P[IC]:=-1;

{Gera tempo de arrumação}

INDIGER:=1;
X:=gergama(INDIGER,IC);
TA[IC]:=X;

```



```

        END;
    END;
END;

3:   BEGIN
        AUMENTO;           {de todos os tempos}

{O camião da frente da fila de ida vai para fila do britador ou descarga}

        BEGIN
            I:=1;
            WHILE FB[I]<>0 DO
                BEGIN
                    I:=I+1;
                END;
            BEGIN
                IF I=1 THEN
                    BEGIN
                        IF (BB=0) AND (CD[BV[1]]<(INDCST-CT)) THEN

{Gera tempo de descarga}

                                BEGIN
                                    BB:=BV[1];
                                    INDIGER:=4;
                                    X:=gergama(INDIGER,BB);
                                    TD[BB]:=X;
                                    BV[1]:=0;
                                END;
                            END;
                            FB[I]:=BV[1];

{Chega os camiões um lugar para a frente}

                                FOR I:=1 TO ND DO
                                    BEGIN
                                        BV[I]:=BV[I+1];
                                    END;
                                END;
                            END;
                        END;

4:   BEGIN
        AUMENTO;           {de todos os tempos}

{O camião BB termina a descarga no tempo MD[BB]} {Verificação se o camião pode fazer nova volta}

        TERE:=TMC[BB]+TR;
        IF TERE<=TFR THEN

{Gera tempo de retorno}

            BEGIN
                CT:=CT+CD[BB]; {O camião descarrega}
                DESC:=DESC+1; {Indicador de nº de descargas}
                INDIGER:=5;
                X:=gergama(INDIGER,BB);
                TB[BB]:=X;
            BEGIN
                H:=0;
                ZK:=0;

```

```

I:=1;
WHILE (BR[I]<>0) AND (TB[BR[I]]<TB[BB]) DO
BEGIN
    H:=H+1;
    I:=I+1;
END;
IF (BR[I]<>0) AND (TB[BR[I]]>=TB[BB]) THEN

{Coloca caminhão na fila de volta (local certo)}

BEGIN
    ZK:=ZK+1;
    ZI:=BR[I];
    BR[I]:=BB;
    FOR H:=I+1 TO ND DO
    BEGIN
        ZZI:=BR[H];
        BR[H]:=ZI;
        ZI:=ZZI;
    END;
END;
IF (H=0) OR (ZK=0) THEN
BEGIN
    BR[I]:=BB
END;
END;

{Um caminhão avança para a descarga} {Só se houver um caminhão na posição 1 da fila do britador e} {se existir
disponível volume para material na tolva}

IF (FB[1]<>0) AND (CD[FB[1]]<(INDCST-CT)) THEN
BEGIN

{Gera tempo de descarga}

BB:=FB[1];
INDIGER:=4;
X:=gergama(INDIGER,BB);
TD[BB]:=X;

{Chega os caminhões um lugar para a frente}

FOR I:=1 TO ND DO
BEGIN
    FB[I]:=FB[I+1];
END;
END
ELSE
BEGIN
    BB:=0;
END;
END
ELSE
BEGIN
    BB:=0;
    IF (FB[1]<>0) AND (CD[FB[1]]<(INDCST-CT)) THEN
    BEGIN

{Gera tempo de descarga}

BB:=FB[1];
INDIGER:=4;

```

```

X:=gergama(INDIGER,BB);
TD[BB]:=X;

{Chega os caminhões um lugar para a frente}

FOR I:=1 TO ND DO
BEGIN
    FB[I]:=FB[I+1];
END;
END;
END;
END;

5: BEGIN
    AUMENTO;          {de todos os tempos}

{O caminhão da frente da fila de volta vai para fila das pás ou para carga}

I:=1;
WHILE FP[I]<>0 DO
BEGIN
    I:=I+1;
END;
IF I=1 THEN
BEGIN
    H:=0;
    ZI:=0;
    FOR K:=1 TO NP DO

{Vê qual a pá com maior tempo de espera}

BEGIN
    IF P[K]=0 THEN
    BEGIN
        H:=H+1;
        IF H=1 THEN
        BEGIN
            Z[K]:=TEP[K];
            ZI:=K;
        END
        ELSE
        BEGIN
            IF Z[ZI]<=TEP[K] THEN
            BEGIN
                Z[K]:=TEP[K];
                ZI:=K;
            END;
        END;
    END;
END;
END;
IF H<>0 THEN
BEGIN
    P[ZI]:=BR[1];
    FOR I:=1 TO ND DO
    BEGIN
        BR[I]:=BR[I+1];
    END;

{Gera tempo de manobra}

INDIGER:=2;
X:=gergama(INDIGER,ZI);

```

```

TC[P[ZI]]:=X*(CD[P[ZI]]/CP[ZI]); {novo - tempo de carga do camião P[ZI]}

END
ELSE
BEGIN
  FP[I]:=BR[1];
  FOR I:=1 TO ND DO
  BEGIN
    BR[I]:=BR[I+1];
  END;
END;
END;
END
ELSE
BEGIN
  FP[I]:=BR[1];
  FOR I:=1 TO ND DO
  BEGIN
    BR[I]:=BR[I+1];
  END;
END;
END;
END;

6: BEGIN
  AUMENTO; {de todos os tempos}

{O britador termina tempo de trabalho} {O britador encrava}

  BRITADOR:=0;
  TTB:=0;

{Gera tempo de encravamento}

  GERENCRAV;
  TEB:=X;
  STEB:=STEB+TEB;
END;

7: BEGIN
  AUMENTO; {de todos os tempos}

{O britador termina tempo de encravamento} {O britador entra em trabalho}

  BRITADOR:=1;
  TEB:=0;

{Gera tempo de trabalho}

  X:=gerweibull(1);
  TTB:=X;
  STTB:=STTB+TTB;
END;

END;
END;
END; {RELEVO}

FINALIZAR;

IF INDREL>1 THEN
BEGIN
  FOR I:=1 TO ND DO

```

```

BEGIN
    SMINFB[I]:=SMINFB[I]+INFB[I];
    MEDINFB[I]:=SMINFB[I]/INDREL;
    STINFB[I]:=STINFB[I]+MEDINFB[I];
    MINFB[I]:=STINFB[I]/INDREL;
END;

for i:=1 to numclass do
begin
    smncl[i]:=smncl[i]+clnt[i];
    medncl[i]:=smncl[i]/INDREL;
    sncl[i]:=sncl[i]+medncl[i];
    s2mncl[i]:=s2mncl[i]+(medncl[i]*medncl[i]);
    mnt[i]:=sncl[i]/INDREL;
    m2nt[i]:=s2mncl[i]/INDREL;
    if (m2nt[i]-(mnt[i]*mnt[i]))<=0 then
    begin
        dp_nt[i]:=0;
    end
    else
    begin
        dp_nt[i]:=SQRT((m2nt[i]-(mnt[i]*mnt[i]))/(INDREL-1));
    end;
end;

SMTETSC:=SMTETSC+STETSC;
MEDTSC:=SMTETSC/INDREL;
STSC:=STSC+MEDTSC;
S2TSC:=S2TSC+(MEDTSC*MEDTSC);
MTSC:=STSC/INDREL;
M2SC:=S2TSC/INDREL;
IF (M2SC-(MTSC*MTSC))<=0 THEN
BEGIN
    DP_TSC:=0;
END
ELSE
BEGIN
    DP_TSC:=SQRT((M2SC-(MTSC*MTSC))/(INDREL-1));
END;

SMEDFP:=SMEDFP+STFP;
MEDFP:=SMEDFP/INDREL;
SFP:=SFP+MEDFP;
S2FP:=S2FP+(MEDFP*MEDFP);
MFP:=SFP/INDREL;
M2FP:=S2FP/INDREL;
IF (M2FP-(MFP*MFP))<=0 THEN
BEGIN
    DP_FP:=0;
END
ELSE
BEGIN
    DP_FP:=SQRT((M2FP-(MFP*MFP))/(INDREL-1));
END;

SMEDPA:=SMEDPA+STPA;
MEDPA:=SMEDPA/INDREL;
SPA:=SPA+MEDPA;
S2PA:=S2PA+(MEDPA*MEDPA);
MPA:=SPA/INDREL;
M2PA:=S2PA/INDREL;
IF (M2PA-(MPA*MPA))<=0 THEN

```

```

BEGIN
    DP_PA:=0;
END
ELSE
BEGIN
    DP_PA:=SQRT ((M2PA-(MPA*MPA)) / (INDREL-1));
END;

SMEDFB:=SMEDFB+STFB;
MEDFB:=SMEDFB/INDREL;
SFB:=SFB+MEDFB;
S2FB:=S2FB+(MEDFB*MEDFB);
MFB:=SFB/INDREL;
M2FB:=S2FB/INDREL;
IF (M2FB-(MFB*MFB)) <=0 THEN
BEGIN
    DP_FB:=0;
END
ELSE
BEGIN
    DP_FB:=SQRT ((M2FB-(MFB*MFB)) / (INDREL-1));
END;

WRITE(filprod,INDCST:8:3,'      ',PRODIA:8:3);
writeln(filprod);

SMEDPR:=SMEDPR+PRODIA;
MEDPR:=SMEDPR/INDREL;
SPR:=SPR+MEDPR;
S2PR:=S2PR+(MEDPR*MEDPR);
MPR:=SPR/INDREL;
M2PR:=S2PR/INDREL;
IF (M2PR-(MPR*MPR)) <=0 THEN
BEGIN
    DP_PR:=0;
END
ELSE
BEGIN
    DP_PR:=SQRT ((M2PR-(MPR*MPR)) / (INDREL-1));
END;

END
ELSE
BEGIN

    FOR I:=1 TO ND DO
    BEGIN
        SMINFB[I]:=INFB[I];
        STINFB[I]:=INFB[I];
    END;

    for i:=1 to numclass do
    begin
        smncl[i]:=clnt[i];
        sncl[i]:=clnt[i];
        s2mncl[i]:=clnt[i]*clnt[i];
    end;

    SMTETSC:=STETSC;
    STSC:=STETSC;
    S2TSC:=STETSC*STETSC;

```

```

    SMEDFP:=STFP;
    SFP:=STFP;
    S2FP:=STFP*STFP;

    SMEDPA:=STPA;
    SPA:=STPA;
    S2PA:=STPA*STPA;

    SMEDFB:=STFB;
    SFB:=STFB;
    S2FB:=STFB*STFB;

    SMEDPR:=PRODIA;
    SPR:=PRODIA;
    S2PR:=PRODIA*PRODIA;

END;

tolva:=1;

for i:=1 to numclass do {estou a ver estabilizo os níveis da tolva}
begin
    if dp_nt[i]<(0.08*mnt[i]) then {condição}
        tolva:=tolva*1
    else
        tolva:=tolva*0;
    end;

    INDREL:=INDREL+1;

    NIVEL;

    AZERAR;

    PRIMEIROS_TEMPOS;

END {N_RELEVOS}

UNTIL
    ((tolva=1)
    AND (DP_FP<(0.00005*MFP))
    AND (DP_PA<(0.00005*MPA))
    AND (DP_FB<(0.00005*MFB))
    AND (DP_TSC<(0.00005*MTSC))
    AND (DP_PR<(0.00005*MPR)))
    OR (INDREL=numaxrel);

WRITE(FILAOUT,MFP:8:3,' ',MPA:8:3,' ',
      MFB:8:3,' ',MPR:8:3,' ',INDREL,' ',MTSC:8:3,' ');

FOR I:=1 TO ND DO WRITE(FILAOUT,MINFB[I]:8:3,' ');

WRITELN(FILAOUT);

```

```

WRITELN(FILANTV, INDCST:4:2);

WRITELN(FILANTV);

FOR I:=1 TO numclass DO

BEGIN
    WRITELN(FILANTV, MNT[I]:8:3);
END;

WRITELN(FILANTV);

SIMETRIA;

INDCST:=INDCST+PSCL;

INDREL:=1;

MISC:=0;
MFP:=0;
MPA:=0;
MFB:=0;
MPR:=0;

for i:=1 to numclass do {novo}
mnt[i]:=0;

FOR I:=1 TO ND DO MINFB[I]:=0;

NUMTOLVA:=NUMTOLVA+1;

END {TOLVA}

UNTIL

{Critério de paragem da análise das tolvas}

(ABS(MODA-((INDCST-CIT)/2))<=2) OR (INDCST>=CST);

{CLRSCR;

IF IMAGPEDREI='N' THEN

BEGIN

    vaiparaxy(5,5);
    WRITE('CAPACIDADE DA TOLVA -> ', (INDCST-PSCL):4:2);
    vaiparaxy(5,7);
    WRITE('TOLVA NŽ', NUMTOLVA);

    vaiparaxy(7,14);
    WRITE('DADOS RELATIVOS AO HISTOGRAMA DE NIVEIS');
    vaiparaxy(10,15);
    WRITE('NŽ DE NIVEIS -----> ', IIII-1);
    vaiparaxy(10,16);
    WRITE('MEDIA -----> ', MEDIA:8:3);
    vaiparaxy(10,17);
    WRITE('DESVIO PADRÃO -----> ', DESVPAD:8:3);
    vaiparaxy(10,18);
    WRITE('MODA -----> ', MODA:8:3);
    vaiparaxy(10,19);
    WRITE('CLASSE DE NIVEL DA MODA -> ', INDICA);

```



```
        END;  
    }  
  
    CLOSE(FILAOUT);  
    CLOSE(FILANTV);  
    close(filprod);  
  
END.  
  
}
```


Apêndice B

Primeira abordagem

B.1 Ficheiro de *input* de dados

```

654321   Semente de aleatórios  \\
5        Passo de observação dos níveis da tolva  \\
0.58     Passo de análise dos níveis da tolva  \\
1000     Número máximo de relevos  \\
29.42    Capacidade da tolva para arranque (> CD)  \\
30       Capacidade máxima da tolva m3  \\
1        Capacidade mínima da tolva m3 (almofada)  \\
0.06     Velocidade de descarga do alimentador m3  \\
1        Número de pás  \\
2        Número de camiões  \\

c:\simulajp\pedreira\dados\dados.out  \\
c:\simulajp\pedreira\tolvas\tolvas.out  \\

25200    Tempo de fim de relevo  \\

0.75     PÁ 1 - Capacidade do balde  \\
120      Tempo médio de arrumação  \\
8        Desvio padrão do tempo de arrumação  \\
50       Tempo médio de manobra unitária  \\
9        Desvio padrão do tempo de manobra unitário

6        CAMIÃO 1 - Capacidade  \\
200.864  Tempo médio de ida  \\
31.2847  Desvio padrão do tempo médio de ida  \\
150.759  Tempo médio de volta  \\
43.4399  Desvio padrão do tempo médio de volta  \\
62.3607  Tempo médio de descarga  \\
12.7763  Desvio padrão do tempo médio de descarga

6        CAMIÃO 2 - Capacidade  \\
200.864  Tempo médio de ida  \\
31.2847  Desvio padrão do tempo médio de ida  \\
150.759  Tempo médio de volta  \\
43.4399  Desvio padrão do tempo médio de volta  \\
62.3607  Tempo médio de descarga  \\
12.7763  Desvio padrão do tempo médio de descarga

0.7478   Alfa para weibull do britador ligado (retirado de sg)  \\
85.75    Beta para weibull do britador ligado (retirado de sg)  \\

```

23 Número de valores de tempos de paragem

	0	Frequência cumulativa relativa	Classe limite	\\
0	0			
0.5259259259	10	\\		
0.6962962963	20	\\		
0.7481481481	30	\\		
0.7777777778	40	\\		
0.8074074074	50	\\		
0.8222222222	60	\\		
0.8296296296	70	\\		
0.837037037	80	\\		
0.8518518519	90	\\		
0.8592592593	100	\\		
0.8666666667	110	\\		
0.8740740741	130	\\		
0.8814814815	140	\\		
0.8962962963	150	\\		
0.9259259259	160	\\		
0.9407407407	170	\\		
0.9555555556	180	\\		
0.962962963	190	\\		
0.9703703704	200	\\		
0.9851851852	210	\\		
0.9925925926	330	\\		
1	440	\\		

B.2 Tabelas de *input* de dados

B.2.1 Variabilidade (passo 10%): tarefa ARRUMAÇÃO - pá

<i>cv</i>	\bar{x}	σ	<i>cv</i>	\bar{x}	σ	<i>cv</i>	\bar{x}	σ
0,006666667	120	0,8	0,340000000	120	40,8	0,673333333	120	80,8
0,013333333	120	1,6	0,346666667	120	41,6	0,680000000	120	81,6
0,020000000	120	2,4	0,353333333	120	42,4	0,686666667	120	82,4
0,026666667	120	3,2	0,360000000	120	43,2	0,693333333	120	83,2
0,033333333	120	4,0	0,366666667	120	44,0	0,700000000	120	84,0
0,040000000	120	4,8	0,373333333	120	44,8	0,706666667	120	84,8
0,046666667	120	5,6	0,380000000	120	45,6	0,713333333	120	85,6
0,053333333	120	6,4	0,386666667	120	46,4	0,720000000	120	86,4
0,060000000	120	7,2	0,393333333	120	47,2	0,726666667	120	87,2
0,066666667	120	8,0	0,400000000	120	48,0	0,733333333	120	88,0
0,073333333	120	8,8	0,406666667	120	48,8	0,740000000	120	88,8
0,080000000	120	9,6	0,413333333	120	49,6	0,746666667	120	89,6
0,086666667	120	10,4	0,420000000	120	50,4	0,753333333	120	90,4
0,093333333	120	11,2	0,426666667	120	51,2	0,760000000	120	91,2
0,100000000	120	12,0	0,433333333	120	52,0	0,766666667	120	92,0
0,106666667	120	12,8	0,440000000	120	52,8	0,773333333	120	92,8
0,113333333	120	13,6	0,446666667	120	53,6	0,780000000	120	93,6
0,120000000	120	14,4	0,453333333	120	54,4	0,786666667	120	94,4
0,126666667	120	15,2	0,460000000	120	55,2	0,793333333	120	95,2
0,133333333	120	16,0	0,466666667	120	56,0	0,800000000	120	96,0
0,140000000	120	16,8	0,473333333	120	56,8	0,806666667	120	96,8
0,146666667	120	17,6	0,480000000	120	57,6	0,813333333	120	97,6
0,153333333	120	18,4	0,486666667	120	58,4	0,820000000	120	98,4
0,160000000	120	19,2	0,493333333	120	59,2	0,826666667	120	99,2
0,166666667	120	20,0	0,500000000	120	60,0	0,833333333	120	100,0
0,173333333	120	20,8	0,506666667	120	60,8	0,840000000	120	100,8
0,180000000	120	21,6	0,513333333	120	61,6	0,846666667	120	101,6
0,186666667	120	22,4	0,520000000	120	62,4	0,853333333	120	102,4
0,193333333	120	23,2	0,526666667	120	63,2	0,860000000	120	103,2
0,200000000	120	24,0	0,533333333	120	64,0	0,866666667	120	104,0
0,206666667	120	24,8	0,540000000	120	64,8	0,873333333	120	104,8
0,213333333	120	25,6	0,546666667	120	65,6	0,880000000	120	105,6
0,220000000	120	26,4	0,553333333	120	66,4	0,886666667	120	106,4
0,226666667	120	27,2	0,560000000	120	67,2	0,893333333	120	107,2
0,233333333	120	28,0	0,566666667	120	68,0	0,900000000	120	108,0
0,240000000	120	28,8	0,573333333	120	68,8	0,906666667	120	108,8
0,246666667	120	29,6	0,580000000	120	69,6	0,913333333	120	109,6
0,253333333	120	30,4	0,586666667	120	70,4	0,920000000	120	110,4
0,260000000	120	31,2	0,593333333	120	71,2	0,926666667	120	111,2
0,266666667	120	32,0	0,600000000	120	72,0	0,933333333	120	112,0
0,273333333	120	32,8	0,606666667	120	72,8	0,940000000	120	112,8
0,280000000	120	33,6	0,613333333	120	73,6	0,946666667	120	113,6
0,286666667	120	34,4	0,620000000	120	74,4	0,953333333	120	114,4
0,293333333	120	35,2	0,626666667	120	75,2	0,960000000	120	115,2
0,300000000	120	36,0	0,633333333	120	76,0	0,966666667	120	116,0
0,306666667	120	36,8	0,640000000	120	76,8	0,973333333	120	116,8
0,313333333	120	37,6	0,646666667	120	77,6	0,980000000	120	117,6
0,320000000	120	38,4	0,653333333	120	78,4	0,986666667	120	118,4
0,326666667	120	39,2	0,660000000	120	79,2	0,993333333	120	119,2
0,333333333	120	40,0	0,666666667	120	80,0			

B.2.2 Variabilidade (passo 10%): tarefa MANOBRA - pá

<i>cv</i>	\bar{x}	σ	<i>cv</i>	\bar{x}	σ	<i>cv</i>	\bar{x}	σ
0,018	50	0,90	0,360	50	18,00	0,702	50	35,10
0,036	50	1,80	0,378	50	18,90	0,720	50	36,00
0,054	50	2,70	0,396	50	19,80	0,738	50	36,90
0,072	50	3,60	0,414	50	20,70	0,756	50	37,80
0,090	50	4,50	0,432	50	21,60	0,774	50	38,70
0,108	50	5,40	0,450	50	22,50	0,792	50	39,60
0,126	50	6,30	0,468	50	23,40	0,810	50	40,50
0,144	50	7,20	0,486	50	24,30	0,828	50	41,40
0,162	50	8,10	0,504	50	25,20	0,846	50	42,30
0,180	50	9,00	0,522	50	26,10	0,864	50	43,20
0,198	50	9,90	0,540	50	27,00	0,882	50	44,10
0,216	50	10,80	0,558	50	27,90	0,900	50	45,00
0,234	50	11,70	0,576	50	28,80	0,918	50	45,90
0,252	50	12,60	0,594	50	29,70	0,936	50	46,80
0,270	50	13,50	0,612	50	30,60	0,954	50	47,70
0,288	50	14,40	0,630	50	31,50	0,972	50	48,60
0,306	50	15,30	0,648	50	32,40	0,990	50	49,50
0,324	50	16,20	0,666	50	33,30			
0,342	50	17,10	0,684	50	34,20			

B.2.3 Variabilidade (passo 10%): tarefa IDA - caminhão

<i>cv</i>	\bar{x}	σ	<i>cv</i>	\bar{x}	σ	<i>cv</i>	\bar{x}	σ
0,0066667	200,864	1,3390933	0,1533333	200,864	30,7991467	0,3000000	200,864	60,2592000
0,0133333	200,864	2,6781867	0,1600000	200,864	32,1382400	0,3066667	200,864	61,5982933
0,0200000	200,864	4,0172800	0,1666667	200,864	33,4773333	0,3133333	200,864	62,9373867
0,0266667	200,864	5,3563733	0,1733333	200,864	34,8164267	0,3200000	200,864	64,2764800
0,0333333	200,864	6,6954667	0,1800000	200,864	36,1555200	0,3266667	200,864	65,6155733
0,0400000	200,864	8,0345600	0,1866667	200,864	37,4946133	0,3333333	200,864	66,9546667
0,0466667	200,864	9,3736533	0,1933333	200,864	38,8337067	0,3400000	200,864	68,2937600
0,0533333	200,864	10,7127467	0,2000000	200,864	40,1728000	0,3466667	200,864	69,6328533
0,0600000	200,864	12,0518400	0,2066667	200,864	41,5118933	0,3533333	200,864	70,9719467
0,1557507	200,864	31,2847000	0,2133333	200,864	42,8509867	0,3600000	200,864	72,3110400
0,0733333	200,864	14,7300267	0,2200000	200,864	44,1900800	0,3666667	200,864	73,6501333
0,0800000	200,864	16,0691200	0,2266667	200,864	45,5291733	0,3733333	200,864	74,9892267
0,0866667	200,864	17,4082133	0,2333333	200,864	46,8682667	0,3800000	200,864	76,3283200
0,0933333	200,864	18,7473067	0,2400000	200,864	48,2073600	0,3866667	200,864	77,6674133
0,1000000	200,864	20,0864000	0,2466667	200,864	49,5464533	0,3933333	200,864	79,0065067
0,1066667	200,864	21,4254933	0,2533333	200,864	50,8855467	0,4000000	200,864	80,3456000
0,1133333	200,864	22,7645867	0,2600000	200,864	52,2246400	0,4066667	200,864	81,6846933
0,1200000	200,864	24,1036800	0,2666667	200,864	53,5637333	0,4133333	200,864	83,0237867
0,1266667	200,864	25,4427733	0,2733333	200,864	54,9028267	0,4200000	200,864	84,3628800
0,1333333	200,864	26,7818667	0,2800000	200,864	56,2419200	0,4266667	200,864	85,7019733
0,1400000	200,864	28,1209600	0,2866667	200,864	57,5810133			
0,1466667	200,864	29,4600533	0,2933333	200,864	58,9201067			

B.2.4 Variabilidade (passo 10%): tarefa VOLTA - caminhão

cv	\bar{x}	σ	cv	\bar{x}	σ	cv	\bar{x}	σ
0,006667	200,864	1,339093	0,153333	200,864	30,799147	0,300000	200,864	60,259200
0,013333	200,864	2,678187	0,160000	200,864	32,138240	0,306667	200,864	61,598293
0,020000	200,864	4,017280	0,166667	200,864	33,477333	0,313333	200,864	62,937387
0,026667	200,864	5,356373	0,173333	200,864	34,816427	0,320000	200,864	64,276480
0,033333	200,864	6,695467	0,180000	200,864	36,155520	0,326667	200,864	65,615573
0,040000	200,864	8,034560	0,186667	200,864	37,494613	0,333333	200,864	66,954667
0,046667	200,864	9,373653	0,193333	200,864	38,833707	0,340000	200,864	68,293760
0,053333	200,864	10,712747	0,200000	200,864	40,172800	0,346667	200,864	69,632853
0,060000	200,864	12,051840	0,206667	200,864	41,511893	0,353333	200,864	70,971947
0,155751	200,864	31,284700	0,213333	200,864	42,850987	0,360000	200,864	72,311040
0,073333	200,864	14,730027	0,220000	200,864	44,190080	0,366667	200,864	73,650133
0,080000	200,864	16,069120	0,226667	200,864	45,529173	0,373333	200,864	74,989227
0,086667	200,864	17,408213	0,233333	200,864	46,868267	0,380000	200,864	76,328320
0,093333	200,864	18,747307	0,240000	200,864	48,207360	0,386667	200,864	77,667413
0,100000	200,864	20,086400	0,246667	200,864	49,546453	0,393333	200,864	79,006507
0,106667	200,864	21,425493	0,253333	200,864	50,885547	0,400000	200,864	80,345600
0,113333	200,864	22,764587	0,260000	200,864	52,224640	0,406667	200,864	81,684693
0,120000	200,864	24,103680	0,266667	200,864	53,563733	0,413333	200,864	83,023787
0,126667	200,864	25,442773	0,273333	200,864	54,902827	0,420000	200,864	84,362880
0,133333	200,864	26,781867	0,280000	200,864	56,241920	0,426667	200,864	85,701973
0,140000	200,864	28,120960	0,286667	200,864	57,581013			
0,146667	200,864	29,460053	0,293333	200,864	58,920107			

B.2.5 Variabilidade (passo 10%): tarefa DESCARGA - caminhão

cv	\bar{x}	σ	cv	\bar{x}	σ	cv	\bar{x}	σ
0,006667	62,3607	0,415738	0,113333	62,3607	7,067546	0,220000	62,3607	13,719354
0,013333	62,3607	0,831476	0,120000	62,3607	7,483284	0,226667	62,3607	14,135092
0,020000	62,3607	1,247214	0,126667	62,3607	7,899022	0,233333	62,3607	14,550830
0,026667	62,3607	1,662952	0,133333	62,3607	8,314760	0,240000	62,3607	14,966568
0,033333	62,3607	2,078690	0,140000	62,3607	8,730498	0,246667	62,3607	15,382306
0,040000	62,3607	2,494428	0,146667	62,3607	9,146236	0,253333	62,3607	15,798044
0,046667	62,3607	2,910166	0,153333	62,3607	9,561974	0,260000	62,3607	16,213782
0,053333	62,3607	3,325904	0,160000	62,3607	9,977712	0,266667	62,3607	16,629520
0,060000	62,3607	3,741642	0,166667	62,3607	10,393450	0,273333	62,3607	17,045258
0,2048774	62,3607	12,776300	0,173333	62,3607	10,809188	0,280000	62,3607	17,460996
0,073333	62,3607	4,573118	0,180000	62,3607	11,224926	0,286667	62,3607	17,876734
0,080000	62,3607	4,988856	0,186667	62,3607	11,640664	0,293333	62,3607	18,292472
0,086667	62,3607	5,404594	0,193333	62,3607	12,056402	0,300000	62,3607	18,708210
0,093333	62,3607	5,820332	0,200000	62,3607	12,472140	0,306667	62,3607	19,123948
0,100000	62,3607	6,236070	0,206667	62,3607	12,887878	0,313333	62,3607	19,539686
0,106667	62,3607	6,651808	0,213333	62,3607	13,303616	0,320000	62,3607	19,955424

B.2.6 Variabilidade (passo 5%): tarefa ARRUMAÇÃO - pá

<i>cv</i>	\bar{x}	σ	<i>cv</i>	\bar{x}	σ	<i>cv</i>	\bar{x}	σ
0,00666667	120	0,8	0,08333333	120	10,0	0,16000000	120	19,2
0,01000000	120	1,2	0,08666667	120	10,4	0,16333333	120	19,6
0,01333333	120	1,6	0,09000000	120	10,8	0,16666667	120	20,0
0,01666667	120	2,0	0,09333333	120	11,2	0,17000000	120	20,4
0,02000000	120	2,4	0,09666667	120	11,6	0,17333333	120	20,8
0,02333333	120	2,8	0,10000000	120	12,0	0,17666667	120	21,2
0,02666667	120	3,2	0,10333333	120	12,4	0,18000000	120	21,6
0,03000000	120	3,6	0,10666667	120	12,8	0,18333333	120	22,0
0,03333333	120	4,0	0,11000000	120	13,2	0,18666667	120	22,4
0,03666667	120	4,4	0,11333333	120	13,6	0,19000000	120	22,8
0,04000000	120	4,8	0,11666667	120	14,0	0,19333333	120	23,2
0,04333333	120	5,2	0,12000000	120	14,4	0,19666667	120	23,6
0,04666667	120	5,6	0,12333333	120	14,8	0,20000000	120	24,0
0,05000000	120	6,0	0,12666667	120	15,2	0,20333333	120	24,4
0,05333333	120	6,4	0,13000000	120	15,6	0,20666667	120	24,8
0,05666667	120	6,8	0,13333333	120	16,0	0,21000000	120	25,2
0,06000000	120	7,2	0,13666667	120	16,4	0,21333333	120	25,6
0,06333333	120	7,6	0,14000000	120	16,8	0,21666667	120	26,0
0,06666667	120	8,0	0,14333333	120	17,2	0,22000000	120	26,4
0,07000000	120	8,4	0,14666667	120	17,6	0,22333333	120	26,8
0,07333333	120	8,8	0,15000000	120	18,0	0,22666667	120	27,2
0,07666667	120	9,2	0,15333333	120	18,4			
0,08000000	120	9,6	0,15666667	120	18,8			

B.2.7 Variabilidade (passo 5%): tarefa MANOBRA - pá

<i>cv</i>	\bar{x}	σ	<i>cv</i>	\bar{x}	σ	<i>cv</i>	\bar{x}	σ
0,018	50	0,90	0,225	50	11,25	0,432	50	21,60
0,027	50	1,35	0,234	50	11,70	0,441	50	22,05
0,036	50	1,80	0,243	50	12,15	0,450	50	22,50
0,045	50	2,25	0,252	50	12,60	0,459	50	22,95
0,054	50	2,70	0,261	50	13,05	0,468	50	23,40
0,063	50	3,15	0,270	50	13,50	0,477	50	23,85
0,072	50	3,60	0,279	50	13,95	0,486	50	24,30
0,081	50	4,05	0,288	50	14,40	0,495	50	24,75
0,090	50	4,50	0,297	50	14,85	0,504	50	25,20
0,099	50	4,95	0,306	50	15,30	0,513	50	25,65
0,108	50	5,40	0,315	50	15,75	0,522	50	26,10
0,117	50	5,85	0,324	50	16,20	0,531	50	26,55
0,126	50	6,30	0,333	50	16,65	0,540	50	27,00
0,135	50	6,75	0,342	50	17,10	0,549	50	27,45
0,144	50	7,20	0,351	50	17,55	0,558	50	27,90
0,153	50	7,65	0,360	50	18,00	0,567	50	28,35
0,162	50	8,10	0,369	50	18,45	0,576	50	28,80
0,171	50	8,55	0,378	50	18,90	0,585	50	29,25
0,180	50	9,00	0,387	50	19,35	0,594	50	29,70
0,189	50	9,45	0,396	50	19,80	0,603	50	30,15
0,198	50	9,90	0,405	50	20,25	0,612	50	30,60
0,207	50	10,35	0,414	50	20,70			
0,216	50	10,80	0,423	50	21,15			

B.2.8 Variabilidade (passo 5%): tarefa IDA - caminhão

<i>cv</i>	\bar{x}	σ	<i>cv</i>	\bar{x}	σ	<i>cv</i>	\bar{x}	σ
0,006667	200,864	1,339093	0,083333	200,864	16,738667	0,160000	200,864	32,138240
0,010000	200,864	2,008640	0,086667	200,864	17,408213	0,163333	200,864	32,807787
0,013333	200,864	2,678187	0,090000	200,864	18,077760	0,166667	200,864	33,477333
0,016667	200,864	3,347733	0,093333	200,864	18,747307	0,170000	200,864	34,146880
0,020000	200,864	4,017280	0,096667	200,864	19,416853	0,173333	200,864	34,816427
0,023333	200,864	4,686827	0,100000	200,864	20,086400	0,176667	200,864	35,485973
0,026667	200,864	5,356373	0,103333	200,864	20,755947	0,180000	200,864	36,155520
0,030000	200,864	6,025920	0,106667	200,864	21,425493	0,183333	200,864	36,825067
0,033333	200,864	6,695467	0,110000	200,864	22,095040	0,186667	200,864	37,494613
0,036667	200,864	7,365013	0,113333	200,864	22,764587	0,190000	200,864	38,164160
0,040000	200,864	8,034560	0,116667	200,864	23,434133	0,193333	200,864	38,833707
0,043333	200,864	8,704107	0,120000	200,864	24,103680	0,196667	200,864	39,503253
0,046667	200,864	9,373653	0,123333	200,864	24,773227	0,200000	200,864	40,172800
0,050000	200,864	10,043200	0,126667	200,864	25,442773	0,203333	200,864	40,842347
0,053333	200,864	10,712747	0,130000	200,864	26,112320	0,206667	200,864	41,511893
0,056667	200,864	11,382293	0,133333	200,864	26,781867	0,210000	200,864	42,181440
0,060000	200,864	12,051840	0,136667	200,864	27,451413	0,213333	200,864	42,850987
0,063333	200,864	12,721387	0,140000	200,864	28,120960	0,216667	200,864	43,520533
0,155751	200,864	31,284700	0,143333	200,864	28,790507	0,220000	200,864	44,190080
0,070000	200,864	14,060480	0,146667	200,864	29,460053	0,223333	200,864	44,859627
0,073333	200,864	14,730027	0,150000	200,864	30,129600	0,226667	200,864	45,529173
0,076667	200,864	15,399573	0,153333	200,864	30,799147			
0,080000	200,864	16,069120	0,156667	200,864	31,468693			

B.2.9 Variabilidade (passo 5%): tarefa VOLTA - caminhão

<i>cv</i>	\bar{x}	σ	<i>cv</i>	\bar{x}	σ	<i>cv</i>	\bar{x}	σ
0,018	150,759	2,713662	0,225	150,759	33,920775	0,432	150,759	65,127888
0,027	150,759	4,070493	0,234	150,759	35,277606	0,441	150,759	66,484719
0,036	150,759	5,427324	0,243	150,759	36,634437	0,450	150,759	67,841550
0,045	150,759	6,784155	0,252	150,759	37,991268	0,459	150,759	69,198381
0,054	150,759	8,140986	0,261	150,759	39,348099	0,468	150,759	70,555212
0,063	150,759	9,497817	0,270	150,759	40,704930	0,477	150,759	71,912043
0,072	150,759	10,854648	0,279	150,759	42,061761	0,486	150,759	73,268874
0,081	150,759	12,211479	0,288	150,759	43,418592	0,495	150,759	74,625705
0,090	150,759	13,568310	0,297	150,759	44,775423	0,504	150,759	75,982536
0,099	150,759	14,925141	0,306	150,759	46,132254	0,513	150,759	77,339367
0,108	150,759	16,281972	0,315	150,759	47,489085	0,522	150,759	78,696198
0,117	150,759	17,638803	0,324	150,759	48,845916	0,531	150,759	80,053029
0,126	150,759	18,995634	0,333	150,759	50,202747	0,540	150,759	81,409860
0,135	150,759	20,352465	0,342	150,759	51,559578	0,549	150,759	82,766691
0,144	150,759	21,709296	0,351	150,759	52,916409	0,558	150,759	84,123522
0,153	150,759	23,066127	0,360	150,759	54,273240	0,567	150,759	85,480353
0,162	150,759	24,422958	0,369	150,759	55,630071	0,576	150,759	86,837184
0,171	150,759	25,779789	0,378	150,759	56,986902	0,585	150,759	88,194015
0,288	150,759	43,439900	0,387	150,759	58,343733	0,594	150,759	89,550846
0,189	150,759	28,493451	0,396	150,759	59,700564	0,603	150,759	90,907677
0,198	150,759	29,850282	0,405	150,759	61,057395	0,612	150,759	92,264508
0,207	150,759	31,207113	0,414	150,759	62,414226			
0,216	150,759	32,563944	0,423	150,759	63,771057			

B.2.10 Variabilidade (passo 5%): tarefa DESCARGA - caminhão

<i>cv</i>	\bar{x}	σ	<i>cv</i>	\bar{x}	σ	<i>cv</i>	\bar{x}	σ
0,00666667	62,3607	0,415738	0,08333333	62,3607	5,196725	0,16000000	62,3607	9,977712
0,01000000	62,3607	0,623607	0,08666667	62,3607	5,404594	0,16333333	62,3607	10,185581
0,01333333	62,3607	0,831476	0,09000000	62,3607	5,612463	0,16666667	62,3607	10,393450
0,01666667	62,3607	1,039345	0,09333333	62,3607	5,820332	0,17000000	62,3607	10,601319
0,02000000	62,3607	1,247214	0,09666667	62,3607	6,028201	0,17333333	62,3607	10,809188
0,02333333	62,3607	1,455083	0,10000000	62,3607	6,236070	0,17666667	62,3607	11,017057
0,02666667	62,3607	1,662952	0,10333333	62,3607	6,443939	0,18000000	62,3607	11,224926
0,03000000	62,3607	1,870821	0,10666667	62,3607	6,651808	0,18333333	62,3607	11,432795
0,03333333	62,3607	2,078690	0,11000000	62,3607	6,859677	0,18666667	62,3607	11,640664
0,03666667	62,3607	2,286559	0,11333333	62,3607	7,067546	0,19000000	62,3607	11,848533
0,04000000	62,3607	2,494428	0,11666667	62,3607	7,275415	0,19333333	62,3607	12,056402
0,04333333	62,3607	2,702297	0,12000000	62,3607	7,483284	0,19666667	62,3607	12,264271
0,04666667	62,3607	2,910166	0,12333333	62,3607	7,691153	0,20000000	62,3607	12,472140
0,05000000	62,3607	3,118035	0,12666667	62,3607	7,899022	0,20333333	62,3607	12,680009
0,05333333	62,3607	3,325904	0,13000000	62,3607	8,106891	0,20666667	62,3607	12,887878
0,05666667	62,3607	3,533773	0,13333333	62,3607	8,314760	0,21000000	62,3607	13,095747
0,06000000	62,3607	3,741642	0,13666667	62,3607	8,522629	0,21333333	62,3607	13,303616
0,06333333	62,3607	3,949511	0,14000000	62,3607	8,730498	0,21666667	62,3607	13,511485
0,20487743	62,3607	12,776300	0,14333333	62,3607	8,938367	0,22000000	62,3607	13,719354
0,07000000	62,3607	4,365249	0,14666667	62,3607	9,146236	0,22333333	62,3607	13,927223
0,07333333	62,3607	4,573118	0,15000000	62,3607	9,354105	0,22666667	62,3607	14,135092
0,07666667	62,3607	4,780987	0,15333333	62,3607	9,561974			
0,08000000	62,3607	4,988856	0,15666667	62,3607	9,769843			

B.3 Tabelas de *output*

B.3.1 Resultados da simulação (passo 10%) – 1p3c

sim.	P (prod.)	p (Σ esp.)	sim.	P (prod.)	p (Σ esp.)	sim.	P (prod.)	p (Σ esp.)
1	276,000	36237	51	275,751	36389	101	277,667	36707
2	276,000	36243	52	271,987	36658	102	273,336	37043
3	275,901	36198	53	275,205	36257	103	276,152	36669
4	275,652	36185	54	273,498	36798	104	274,954	36622
5	275,396	36161	55	273,269	36768	105	273,397	37104
6	275,445	36145	56	275,026	36560	106	276,191	36696
7	275,501	36155	57	277,319	36504	107	270,529	37201
8	275,219	36144	58	272,943	36855	108	276,343	36823
9	275,315	36140	59	270,731	36899	109	275,357	36770
10	275,329	36146	60	276,732	36720	110	274,460	37045
11	275,405	36128	61	275,102	36875	111	278,258	36624
12	275,387	36128	62	273,968	36689	112	275,998	36782
13	275,823	36102	63	276,490	36604	113	274,915	36867
14	275,569	36121	64	272,125	36873	114	275,232	36785
15	274,827	36180	65	273,750	36755	115	278,341	36719
16	274,807	36160	66	275,254	36744	116	273,033	36904
17	275,412	36182	67	277,473	36593	117	275,161	36817
18	275,475	36126	68	275,767	36633	118	275,195	36907
19	275,262	36150	69	271,975	36763	119	275,825	37013
20	275,761	36155	70	275,410	36825	120	277,712	36510
21	274,676	36220	71	274,535	36889	121	271,396	37053
22	274,939	36196	72	275,424	36846	122	277,896	36737
23	275,718	36097	73	274,058	36794	123	276,466	37071
24	275,453	36156	74	273,656	36947	124	273,371	36934
25	275,695	36122	75	272,857	36879	125	274,565	36922
26	275,039	36152	76	274,945	36731	126	275,337	36892
27	274,906	36146	77	279,146	36586	127	275,774	36675
28	276,786	36089	78	273,190	37124	128	275,022	36907
29	276,647	36190	79	274,797	36867	129	272,467	37024
30	277,290	36194	80	271,679	36883	130	274,124	37071
31	276,047	36048	81	274,343	37006	131	274,050	36914
32	275,811	36158	82	272,022	36885	132	272,180	36979
33	275,865	36231	83	276,072	36746	133	274,515	36988
34	276,017	36306	84	274,604	36833	134	273,911	36986
35	275,433	36250	85	274,250	36775	135	273,614	36934
36	276,429	36301	86	272,007	36955	136	271,216	37353
37	278,834	36172	87	273,956	36845	137	274,066	37077
38	276,408	36293	88	273,213	36925	138	276,436	37026
39	275,403	36425	89	271,061	36935	139	270,657	37295
40	274,151	36428	90	273,602	36993	140	271,889	37059
41	274,166	36478	91	272,657	36962	141	272,257	37079
42	274,728	36475	92	270,838	37148	142	276,476	37022
43	277,924	36227	93	274,427	36763	143	272,977	37159
44	272,834	36588	94	274,958	36707	144	275,772	36772
45	276,147	36332	95	276,363	36981	145	281,214	36762
46	275,421	36547	96	277,008	36782	146	276,398	36884
47	275,081	36359	97	272,623	36740	147	275,251	37047
48	277,496	36464	98	272,952	37133	148	271,532	37253
49	277,069	36380	99	275,253	37018	149	274,396	36845
50	278,007	36160	100	275,124	36813	150	274,900	36910

B.3.2 Resultados da simulação (passo 10%) – 2p5c

sim.	P (prod.)	p (Σ esp.)	sim.	P (prod.)	p (Σ esp.)	sim.	P (prod.)	p (Σ esp.)
1	552,000	47535	51	549,081	48610	101	546,295	48881
2	552,000	47456	52	553,389	48267	102	547,013	48921
3	551,640	47362	53	547,760	48371	103	551,868	48759
4	551,166	47317	54	537,470	48657	104	548,231	48514
5	550,855	47299	55	549,624	48429	105	548,716	48986
6	550,756	47248	56	547,735	48905	106	546,836	49272
7	550,842	47304	57	549,674	48445	107	541,773	49194
8	550,575	47275	58	556,472	48328	108	553,270	48848
9	550,829	47285	59	547,778	48595	109	549,231	48593
10	550,846	47247	60	547,224	48989	110	550,582	48802
11	551,829	47270	61	550,347	48745	111	549,612	49007
12	551,006	47247	62	546,189	48671	112	549,183	48803
13	551,865	47227	63	548,061	48749	113	549,500	49008
14	552,501	47179	64	543,651	49143	114	550,917	48572
15	550,157	47393	65	547,161	48340	115	549,831	48748
16	550,926	47254	66	546,926	48998	116	545,063	48988
17	551,158	47321	67	551,855	48941	117	549,732	49010
18	549,977	47353	68	544,768	48743	118	549,263	48845
19	550,798	47302	69	554,375	48724	119	548,961	49016
20	549,908	47509	70	555,149	48779	120	545,639	49156
21	550,547	47313	71	544,957	48685	121	552,652	48808
22	549,648	47427	72	548,590	48847	122	547,290	48759
23	551,442	47360	73	554,374	48254	123	549,191	48903
24	550,536	47368	74	545,258	48577	124	547,458	49143
25	549,505	47432	75	545,677	48951	125	549,433	49143
26	551,158	47299	76	548,770	48594	126	547,339	49300
27	550,050	47447	77	553,219	48527	127	542,523	49531
28	554,124	47283	78	542,720	49012	128	556,406	48630
29	549,718	47515	79	552,836	48575	129	547,728	49313
30	552,485	47355	80	550,068	48968	130	550,713	49162
31	550,164	47471	81	545,970	48897	131	545,691	49313
32	552,696	47463	82	549,028	49014	132	547,212	49262
33	549,485	47249	83	544,302	49193	133	549,703	48892
34	550,434	47541	84	544,358	48693	134	546,511	49081
35	551,189	47890	85	543,514	49229	135	551,853	48534
36	549,051	48011	86	552,315	48686	136	553,118	48872
37	552,754	47493	87	543,981	49299	137	543,808	49514
38	553,162	47508	88	548,637	48871	138	551,908	49016
39	556,886	47567	89	549,388	48984	139	553,872	48671
40	548,104	47684	90	549,427	48713	140	544,157	49188
41	549,405	47825	91	544,994	48634	141	551,821	48927
42	554,144	47665	92	544,396	49344	142	543,449	49887
43	551,835	48074	93	549,545	48731	143	550,341	48785
44	548,130	48164	94	552,866	48492	144	547,801	49150
45	556,399	47691	95	554,914	48383	145	547,140	48979
46	547,585	48398	96	543,796	49106	146	545,229	49099
47	548,856	48221	97	550,351	48858	147	554,801	48760
48	553,324	48093	98	548,284	49101	148	545,604	49136
49	549,604	48354	99	550,646	48684	149	541,423	49461
50	551,123	48348	100	551,008	49155	150	550,548	48823

B.3.3 Resultados da simulação (passo 10%) – 2p6c

sim.	P (prod.)	p (Σ esp.)	sim.	P (prod.)	p (Σ esp.)	sim.	P (prod.)	p (Σ esp.)
1	551,992	72542	51	550,573	72819	101	553,338	72603
2	552,000	72493	52	554,199	72495	102	552,899	72960
3	551,789	72449	53	551,140	72500	103	558,102	72152
4	551,013	72347	54	553,021	72587	104	551,905	72798
5	550,850	72297	55	549,395	72825	105	553,841	72725
6	550,650	72301	56	549,470	72738	106	553,942	72652
7	550,494	72265	57	552,234	72434	107	552,447	72668
8	550,747	72301	58	556,038	72482	108	553,903	72791
9	550,963	72278	59	549,134	72681	109	552,446	73091
10	551,196	72233	60	552,607	72648	110	553,631	72355
11	551,188	72291	61	555,677	72379	111	551,778	72713
12	551,212	72199	62	560,874	72528	112	554,323	72803
13	550,887	72302	63	550,770	72772	113	553,932	72420
14	551,311	72280	64	549,373	72860	114	555,814	72593
15	550,400	72336	65	555,000	72340	115	552,430	72501
16	551,035	72298	66	551,201	72889	116	551,792	72658
17	550,891	72231	67	553,599	72939	117	554,170	72785
18	551,292	72310	68	555,049	72605	118	556,289	72313
19	550,740	72298	69	556,360	72384	119	551,189	72939
20	551,545	72215	70	552,702	72739	120	554,452	72720
21	551,882	72216	71	552,727	72712	121	552,430	72660
22	549,837	72368	72	552,380	72664	122	553,565	72741
23	551,432	72235	73	556,803	72619	123	560,210	72317
24	552,349	72244	74	557,017	72636	124	556,706	72540
25	551,419	72159	75	551,825	72720	125	553,250	72596
26	551,527	72187	76	552,875	72531	126	553,576	72853
27	551,381	72326	77	552,442	72650	127	559,650	72362
28	551,055	72281	78	551,594	72674	128	556,651	72560
29	550,412	72373	79	552,045	72598	129	556,297	72401
30	552,341	72231	80	558,110	72453	130	555,719	72455
31	552,295	72211	81	554,058	72628	131	551,310	73126
32	550,489	72447	82	554,892	72550	132	555,947	72597
33	551,059	72479	83	550,028	72894	133	558,351	72457
34	554,110	72249	84	557,316	72465	134	549,949	73067
35	552,474	72293	85	554,050	72673	135	554,126	72714
36	553,767	72243	86	550,809	72746	136	557,056	72441
37	550,674	72458	87	550,862	72940	137	553,403	72828
38	553,169	72361	88	554,089	72747	138	552,579	72944
39	551,820	72581	89	554,203	72388	139	556,385	72686
40	549,986	72425	90	557,738	72399	140	554,317	72452
41	553,196	72310	91	555,107	72450	141	553,316	72880
42	553,008	72436	92	552,813	72477	142	557,887	72512
43	553,305	72450	93	553,345	72719	143	551,430	72904
44	553,118	72481	94	551,251	72720	144	558,573	72528
45	553,752	72305	95	554,064	72659	145	551,921	72795
46	554,229	72278	96	550,125	72899	146	554,756	72513
47	555,214	72267	97	553,064	72674	147	555,653	72489
48	549,275	72931	98	550,461	72630	148	548,546	73149
49	553,651	72244	99	554,631	72650	149	555,110	72665
50	557,642	72218	100	554,712	72817	150	554,289	72779

B.3.4 Resultados da simulação (passo 10%) – 3p9c

sim.	P (prod.)	p (Σ esp.)	sim.	P (prod.)	p (Σ esp.)	sim.	P (prod.)	p (Σ esp.)
1	827,689	108910	51	833,559	108846	101	825,982	109224
2	827,715	108799	52	829,134	108890	102	830,438	109297
3	827,320	108682	53	828,204	108889	103	829,345	108805
4	826,316	108566	54	828,260	108932	104	831,148	109227
5	825,500	108492	55	829,998	109261	105	828,144	108931
6	825,551	108442	56	827,399	109277	106	825,162	109432
7	825,714	108445	57	828,963	109037	107	830,820	109207
8	825,443	108451	58	831,880	109162	108	822,642	109590
9	825,871	108415	59	828,376	109071	109	823,816	109436
10	825,042	108499	60	825,436	109621	110	832,410	108733
11	825,733	108431	61	822,442	109512	111	824,609	109853
12	824,790	108468	62	833,544	108947	112	828,540	109244
13	826,907	108404	63	824,198	109674	113	827,188	108801
14	825,841	108445	64	840,056	108237	114	824,249	109289
15	825,600	108484	65	824,950	109205	115	825,733	109523
16	826,478	108425	66	826,691	109636	116	827,021	109523
17	825,628	108504	67	824,398	109208	117	827,961	109059
18	825,853	108489	68	826,748	109846	118	828,814	108866
19	825,924	108442	69	822,213	109718	119	831,207	109256
20	825,078	108474	70	829,196	109387	120	827,454	108889
21	826,136	108507	71	821,677	110051	121	825,405	109251
22	826,332	108370	72	829,694	109060	122	829,855	109382
23	826,568	108435	73	828,152	109343	123	828,724	109563
24	826,056	108410	74	827,078	109678	124	829,899	109172
25	825,418	108585	75	827,615	109482	125	829,631	109615
26	826,759	108473	76	820,845	109723	126	817,786	109976
27	827,914	108512	77	830,791	108823	127	827,212	109584
28	824,011	108553	78	829,246	109078	128	822,949	109272
29	826,599	108472	79	828,671	109463	129	828,980	108845
30	825,874	108494	80	824,867	109649	130	826,895	109399
31	828,044	108430	81	828,550	109452	131	829,034	109438
32	825,418	108626	82	826,524	109373	132	823,940	109810
33	824,487	108538	83	825,689	109499	133	833,366	109129
34	826,870	108532	84	829,543	109436	134	830,428	109609
35	827,537	108659	85	831,501	109110	135	827,036	109180
36	826,891	108563	86	832,187	109207	136	828,827	109500
37	825,352	108798	87	825,197	109565	137	831,244	109114
38	827,405	108620	88	827,381	109509	138	829,033	108925
39	825,925	108645	89	825,100	109417	139	831,010	109251
40	826,188	108648	90	828,695	109339	140	826,579	109254
41	826,700	108892	91	826,407	109149	141	824,569	109597
42	825,961	108776	92	823,425	109322	142	828,426	109528
43	829,545	108728	93	826,878	109523	143	826,531	109393
44	828,768	108819	94	827,490	109347	144	832,644	109001
45	829,019	108690	95	836,028	109110	145	830,518	109100
46	828,004	108882	96	824,347	109860	146	826,575	109287
47	822,957	109012	97	823,872	109437	147	826,826	109534
48	824,562	109071	98	823,464	109587	148	831,586	109247
49	826,167	109144	99	831,483	109270	149	829,726	109578
50	828,576	108991	100	829,169	109515	150	827,869	109604

B.3.5 Resultados da simulação (passo 5%) – 1p3c

sim.	P (prod.)	p (Σ esp.)	sim.	P (prod.)	p (Σ esp.)
1	276,000	36237	35	275,576	36105
2	276,000	36243	36	276,429	36301
3	275,966	36235	37	276,062	36081
4	275,652	36185	38	276,408	36293
5	275,765	36205	39	274,302	36191
6	275,445	36145	40	274,151	36428
7	275,482	36169	41	275,391	36128
8	275,219	36144	42	274,728	36475
9	275,519	36154	43	275,293	36151
10	275,329	36146	44	272,834	36588
11	275,368	36147	45	275,545	36139
12	275,387	36128	46	275,421	36547
13	275,241	36134	47	276,124	36107
14	275,569	36121	48	277,496	36464
15	275,286	36173	49	275,668	36124
16	274,807	36160	50	278,007	36160
17	275,396	36151	51	275,117	36205
18	275,475	36126	52	271,987	36658
19	275,432	36189	53	275,687	36097
20	275,761	36155	54	273,498	36798
21	275,826	36139	55	277,305	36154
22	274,939	36196	56	275,026	36560
23	274,978	36171	57	276,745	36073
24	275,453	36156	58	272,943	36855
25	274,614	36130	59	275,142	36207
26	275,039	36152	60	276,732	36720
27	275,242	36134	61	276,500	36175
28	276,786	36089	62	273,968	36689
29	275,229	36128	63	275,530	36201
30	277,290	36194	64	272,125	36873
31	274,894	36156	65	276,037	36286
32	275,811	36158	66	275,254	36744
33	275,078	36087	67	275,169	36206
34	276,017	36306	68	275,767	36633

B.3.6 Resultados da simulação (passo 5%) – 2p5c

sim.	P (prod.)	p (Σ esp.)	sim.	P (prod.)	p (Σ esp.)
1	552,000	47535	35	550,409	47303
2	552,000	47456	36	550,798	47302
3	551,950	47454	37	551,581	47246
4	551,640	47362	38	549,908	47509
5	551,424	47337	39	551,890	47337
6	551,166	47317	40	550,547	47313
7	550,923	47278	41	550,303	47452
8	550,855	47299	42	549,648	47427
9	550,855	47306	43	549,967	47356
10	550,756	47248	44	551,442	47360
11	550,105	47256	45	550,936	47265
12	550,842	47304	46	550,536	47368
13	550,566	47263	47	549,097	47648
14	550,575	47275	48	549,505	47432
15	550,545	47317	49	549,618	47510
16	550,829	47285	50	551,158	47299
17	551,088	47299	51	549,087	47574
18	550,846	47247	52	550,050	47447
19	550,562	47292	53	552,929	47259
20	551,829	47270	54	554,124	47283
21	549,526	47337	55	552,641	47481
22	551,006	47247	56	549,718	47515
23	550,184	47332	57	548,893	47767
24	551,865	47227	58	552,485	47355
25	549,596	47355	59	552,093	47384
26	552,501	47179	60	550,164	47471
27	551,948	47126	61	552,613	47514
28	550,157	47393	62	552,696	47463
29	550,214	47373	63	549,963	47328
30	550,926	47254	64	549,485	47249
31	550,013	47343	65	551,020	47429
32	551,158	47321	66	550,434	47541
33	551,731	47333	67	550,484	47510
34	549,977	47353	68	551,189	47890

B.3.7 Resultados da simulação (passo 5%) – 2p6c

sim.	P (prod.)	p (Σ esp.)	sim.	P (prod.)	p (Σ esp.)
1	551,992	72542	35	551,580	72236
2	552,000	72493	36	553,767	72243
3	551,995	72476	37	550,458	72292
4	551,013	72347	38	553,169	72361
5	551,495	72376	39	550,971	72333
6	550,650	72301	40	549,986	72425
7	550,762	72330	41	551,485	72219
8	550,747	72301	42	553,008	72436
9	550,623	72312	43	551,936	72152
10	551,196	72233	44	553,118	72481
11	550,480	72290	45	552,261	72160
12	551,212	72199	46	554,229	72278
13	550,642	72333	47	551,606	72269
14	551,311	72280	48	549,275	72931
15	551,177	72221	49	551,032	72368
16	551,035	72298	50	557,642	72218
17	550,490	72321	51	550,545	72241
18	551,292	72310	52	554,199	72495
19	551,124	72285	53	551,769	72307
20	551,545	72215	54	553,021	72587
21	550,482	72332	55	553,923	72195
22	549,837	72368	56	549,470	72738
23	551,558	72215	57	551,035	72271
24	552,349	72244	58	556,038	72482
25	550,509	72264	59	550,961	72369
26	551,527	72187	60	552,607	72648
27	551,200	72258	61	551,075	72418
28	551,055	72281	62	560,874	72528
29	551,072	72306	63	553,041	72298
30	552,341	72231	64	549,373	72860
31	549,868	72433	65	550,384	72444
32	550,489	72447	66	551,201	72889
33	550,160	72246	67	551,723	72215
34	554,110	72249	68	555,049	72605

B.3.8 Resultados da simulação (passo 5%) – 3p9c

sim.	P (prod.)	p (Σ esp.)	sim.	P (prod.)	p (Σ esp.)
1	827,689	108910	35	825,853	108489
2	827,712	108856	36	825,889	108466
3	827,715	108799	37	825,924	108442
4	827,520	108741	38	824,001	108261
5	827,320	108682	39	825,078	108474
6	826,817	108624	40	824,907	108398
7	826,316	108566	41	826,136	108507
8	825,908	108529	42	826,234	108438
9	825,500	108492	43	826,332	108370
10	825,526	108467	44	827,250	108508
11	825,551	108442	45	826,568	108435
12	825,633	108443	46	827,112	108528
13	825,714	108445	47	826,056	108410
14	825,569	108447	48	825,737	108498
15	825,443	108451	49	825,418	108585
16	825,657	108433	50	826,089	108529
17	825,871	108415	51	826,759	108473
18	825,497	108462	52	827,914	108568
19	825,042	108499	53	827,914	108512
20	825,488	108478	54	825,963	108532
21	825,733	108431	55	824,011	108553
22	824,362	108260	56	825,305	108512
23	824,790	108468	57	826,599	108472
24	825,849	108436	58	826,237	108483
25	826,907	108404	59	825,874	108494
26	826,174	108398	60	827,259	108501
27	825,841	108445	61	828,044	108430
28	825,901	108488	62	826,731	108528
29	825,600	108484	63	825,418	108626
30	825,039	108323	64	824,953	108582
31	826,478	108425	65	824,487	108538
32	826,053	108464	66	825,679	108535
33	825,628	108504	67	826,870	108532
34	826,741	108628	68	827,204	108596

Apêndice C

Segunda abordagem

C.1 Ficheiro de *input* de dados

<i>cv</i>	Arrumação	Manobra	Ida	Volta	Descarga
0,00000001	0,012	0,005	0,0200864	0,0150759	0,0062361
0,025	3,000	1,250	5,0216000	3,7689750	1,5590175
0,050	6,000	2,500	10,0432000	7,5379500	3,1180350
0,075	9,000	3,750	15,0648000	11,3069250	4,6770525
0,100	12,000	5,000	20,0864000	15,0759000	6,2360700
0,125	15,000	6,250	25,1080000	18,8448750	7,7950875
0,150	18,000	7,500	30,1296000	22,6138500	9,3541050
0,175	21,000	8,750	35,1512000	26,3828250	10,9131225
0,200	24,000	10,000	40,1728000	30,1518000	12,4721400
0,225	27,000	11,250	45,1944000	33,9207750	14,0311575
0,250	30,000	12,500	50,2160000	37,6897500	15,5901750
0,275	33,000	13,750	55,2376000	41,4587250	17,1491925
0,300	36,000	15,000	60,2592000	45,2277000	18,7082100
0,325	39,000	16,250	65,2808000	48,9966750	20,2672275
0,350	42,000	17,500	70,3024000	52,7656500	21,8262450
0,375	45,000	18,750	75,3240000	56,5346250	23,3852625
0,400	48,000	20,000	80,3456000	60,3036000	24,9442800
0,425	51,000	21,250	85,3672000	64,0725750	26,5032975
0,450	54,000	22,500	90,3888000	67,8415500	28,0623150
0,475	57,000	23,750	95,4104000	71,6105250	29,6213325
0,500	60,000	25,000	100,4320000	75,3795000	31,1803500
0,525	63,000	26,250	105,4536000	79,1484750	32,7393675
0,550	66,000	27,500	110,4752000	82,9174500	34,2983850
0,575	69,000	28,750	115,4968000	86,6864250	35,8574025
0,600	72,000	30,000	120,5184000	90,4554000	37,4164200
0,625	75,000	31,250	125,5400000	94,2243750	38,9754375
0,650	78,000	32,500	130,5616000	97,9933500	40,5344550
0,675	81,000	33,750	135,5832000	101,7623250	42,0934725
0,700	84,000	35,000	140,6048000	105,5313000	43,6524900
0,725	87,000	36,250	145,6264000	109,3002750	45,2115075
0,750	90,000	37,500	150,6480000	113,0692500	46,7705250
0,775	93,000	38,750	155,6696000	116,8382250	48,3295425
0,800	96,000	40,000	160,6912000	120,6072000	49,8885600
0,825	99,000	41,250	165,7128000	124,3761750	51,4475775
0,850	102,000	42,500	170,7344000	128,1451500	53,0065950
0,875	105,000	43,750	175,7560000	131,9141250	54,5656125
0,900	108,000	45,000	180,7776000	135,6831000	56,1246300
0,925	111,000	46,250	185,7992000	139,4520750	57,6836475
0,950	114,000	47,500	190,8208000	143,2210500	59,2426650
0,975	117,000	48,750	195,8424000	146,9900250	60,8016825
1,000	120,000	50,000	200,8640000	150,7590000	62,3607000

C.2 Resultados da simulação (resumo)

1p3c		
<i>cv</i>	P (prod.)	p (Σ esp.)
0,000001%	276,000	603,94
2,5%	275,987	603,81
5%	275,548	603,08
7,5%	275,448	602,32
10%	275,142	602,72
12,5%	275,189	602,57
15%	275,278	602,10
17,5%	275,367	602,20
20%	275,166	602,74
22,5%	275,657	601,95
25%	275,436	601,39

2p5c		
<i>cv</i>	P (prod.)	p (Σ esp.)
0,000001%	552,000	792,43
2,5%	551,892	790,40
5%	551,133	788,36
7,5%	550,915	788,07
10%	550,723	788,35
12,5%	550,693	788,48
15%	549,995	787,76
17,5%	550,370	788,86
20%	550,168	788,61
22,5%	550,403	788,52
25%	551,495	787,58

2p6c		
<i>cv</i>	P (prod.)	p (Σ esp.)
0,000001%	552,000	1209,04
2,5%	551,992	1207,98
5%	551,353	1206,11
7,5%	550,758	1205,12
10%	550,540	1204,76
12,5%	550,639	1204,72
15%	550,465	1205,13
17,5%	550,384	1205,15
20%	551,116	1203,63
22,5%	551,275	1204,88
25%	551,505	1203,46

3p9c		
cv	P (prod.)	p (Σ esp.)
0,000001%	827,667	1815,17
2,5%	827,514	1812,88
5%	826,557	1809,36
7,5%	826,102	1807,23
10%	825,655	1807,08
12,5%	825,637	1807,49
15%	825,647	1806,98
17,5%	825,655	1806,93
20%	825,321	1806,70
22,5%	825,052	1807,41
25%	825,915	1806,84

Apêndice D

Terceira abordagem

D.1 Ficheiro de *input* de dados

<i>cv</i>	Arrumação	Manobra	Ida	Volta	Descarga
0,00000001	0,012	0,005	0,0200864	0,0150759	0,0062361
0,075	9,000	3,750	15,0648000	11,3069250	4,6770525

D.2 Resultados da simulação

D.2.1 $cv = 0,00000001$

	1 pá	2 pás	3 pás	4 pás	5 pás	6 pás	7 pás	8 pás	9 pás	10 pás	11 pás	12 pás
12 cam.	262741	223549	184392	153763	174485	200189	226251	247332	267589	300940	328723	347423
11 cam.	237574	198382	159223	129917	152531	173370	198799	229260	247506	272270	307164	319158
10 cam.	212407	173214	134053	106263	125776	151799	173056	202912	225740	253698	277215	296713
9 cam.	187239	148046	108910	81412	101497	130189	150889	178905	202431	227765	252282	275660
8 cam.	162072	122878	83897	58469	79911	103787	129785	154579	178024	202485	231092	253563
7 cam.	136905	97710	59061	36766	56463	80629	104073	133174	155644	180058	205556	231016
6 cam.	111738	72542	34258	17227	42728	68174	93174	117782	142671	167225	192673	217387
5 cam.	86571	47546	10862	24165	49434	74310	99291	124330	149451	173958	199278	224231
4 cam.	61404	22557	14008	38488	63316	87659	113416	138306	163410	188155	213897	237999
3 cam.	36237	4387	28923	53744	78331	104048	126685	151142	178395	203095	227307	251842
2 cam.	11244	19029	44120	68534	94240	119269	143826	168307	194404	218633	243882	268944
1 cam.	9478	34420	59352	84392	109298	134214	159309	184226	209136	234122	258981	284141

D.2.2 $cv = 0,075$

	1 pá	2 pás	3 pás	4 pás	5 pás	6 pás	7 pás	8 pás	9 pás	10 pás	11 pás	12 pás
12 cam.	262501	223291	183927	151708	171117	197278	223983	250399	270668	294404	329454	349333
11 cam.	237350	198127	158736	129789	148809	172730	199460	224112	249506	270376	299168	323040
10 cam.	212200	172963	133560	105422	127177	150625	176327	204485	229483	251203	277370	299226
9 cam.	187049	147799	108434	81896	102595	123082	154754	177670	202306	226398	252105	279206
8 cam.	161898	122635	83396	59658	79830	102165	126570	155570	178197	204006	231056	252505
7 cam.	136748	97471	58433	35419	56260	82516	103395	129833	156095	180040	204573	228740
6 cam.	111597	72307	34123	20081	44206	68323	92334	118419	144720	168279	194017	219114
5 cam.	86446	47284	13277	25278	49645	75195	100210	125439	149954	175009	200282	224947
4 cam.	61295	22542	14814	38815	63810	88770	113770	138766	163819	188370	213788	238754
3 cam.	36139	6160	28639	53625	78545	103515	128743	153607	178802	203655	228569	253673
2 cam.	11280	18880	43776	68697	93825	118722	143714	168818	193853	218637	243739	268641
1 cam.	9239	34212	59181	84209	109121	134125	159130	184069	209077	234015	259127	284063

D.2.3 Diferença ($p_{cv=0,075} - p_{cv=0,00000001}$)

	1 pá	2 pás	3 pás	4 pás	5 pás	6 pás	7 pás	8 pás	9 pás	10 pás	11 pás	12 pás
12 cam.	240	259	466	2055	3368	2911	2268	-3067	-3079	6537	-731	-1910
11 cam.	223	255	487	127	3721	640	-661	5148	-2000	1894	7996	-3882
10 cam.	207	251	493	840	-1401	1174	-3271	-1573	-3743	2495	-155	-2513
9 cam.	190	247	476	-484	-1098	7107	-3865	1235	126	1368	177	-3547
8 cam.	174	243	501	-1189	81	1622	3215	-991	-173	-1521	36	1058
7 cam.	158	239	628	1347	203	-1887	678	3341	-450	18	983	2275
6 cam.	141	235	135	-2854	-1478	-149	840	-636	-2049	-1054	-1344	-1727
5 cam.	125	262	-2415	-1112	-211	-886	-919	-1109	-503	-1051	-1004	-715
4 cam.	108	15	-806	-328	-494	-1112	-354	-461	-409	-215	109	-755
3 cam.	97	-1773	284	119	-213	533	-2058	-2465	-407	-560	-1262	-1832
2 cam.	-36	149	343	-163	416	548	113	-511	551	-4	142	303
1 cam.	238	208	170	183	177	89	179	156	59	108	-146	78

Apêndice E

Quarta abordagem

E.1 Ficheiro de *input* de dados

E.1.1 $0\% < cv < 5\%$ – passo 0,5%

cv	Arrumação	Manobra	Ida	Volta	Descarga
0,00000001	0,012	0,005	0,020086	0,015076	0,006236
0,005	0,600	0,250	1,004320	0,753795	0,311804
0,010	1,200	0,500	2,008640	1,507590	0,623607
0,015	1,800	0,750	3,012960	2,261385	0,935411
0,020	2,400	1,000	4,017280	3,015180	1,247214
0,025	3,000	1,250	5,021600	3,768975	1,559018
0,030	3,600	1,500	6,025920	4,522770	1,870821
0,035	4,200	1,750	7,030240	5,276565	2,182625
0,040	4,800	2,000	8,034560	6,030360	2,494428
0,045	5,400	2,250	9,038880	6,784155	2,806232
0,050	6,000	2,500	10,043200	7,537950	3,118035

E.1.2 $0\% < cv < 5\%$ – passo 0,25%

cv	Arrumação	Manobra	Ida	Volta	Descarga
0,00000001	0,012	0,005	0,020086	0,015076	0,006236
0,0025	0,300	0,125	0,502160	0,376898	0,155902
0,0050	0,600	0,250	1,004320	0,753795	0,311804
0,0075	0,900	0,375	1,506480	1,130693	0,467705
0,0100	1,200	0,500	2,008640	1,507590	0,623607
0,0125	1,500	0,625	2,510800	1,884488	0,779509
0,0150	1,800	0,750	3,012960	2,261385	0,935411
0,0175	2,100	0,875	3,515120	2,638283	1,091312
0,0200	2,400	1,000	4,017280	3,015180	1,247214
0,0225	2,700	1,125	4,519440	3,392078	1,403116
0,0250	3,000	1,250	5,021600	3,768975	1,559018
0,0275	3,300	1,375	5,523760	4,145873	1,714919
0,0300	3,600	1,500	6,025920	4,522770	1,870821
0,0325	3,900	1,625	6,528080	4,899668	2,026723
0,0350	4,200	1,750	7,030240	5,276565	2,182625
0,0375	4,500	1,875	7,532400	5,653463	2,338526
0,0400	4,800	2,000	8,034560	6,030360	2,494428
0,0425	5,100	2,125	8,536720	6,407258	2,650330
0,0450	5,400	2,250	9,038880	6,784155	2,806232
0,0475	5,700	2,375	9,541040	7,161053	2,962133
0,0500	6,000	2,500	10,043200	7,537950	3,118035

E.2 Resultados da simulação

E.2.1 $0\% < cv < 5\%$ – passo 0,5% (resumo)

1p3c		
cv	P (prod.)	p (Σ esp.)
0,00000001	276,000	36237
0,005	276,000	36236
0,010	276,000	36241
0,015	276,000	36231
0,020	276,000	36240
0,025	275,987	36229
0,030	275,969	36217
0,035	275,907	36202
0,040	275,732	36189
0,045	275,735	36185
0,050	275,548	36185

2p5c		
cv	P (prod.)	p (Σ esp.)
0,00000001	552,000	47546
0,005	552,000	47537
0,010	552,000	47503
0,015	551,972	47476
0,020	552,000	47437
0,025	551,892	47424
0,030	551,885	47405
0,035	551,594	47393
0,040	551,629	47350
0,045	551,398	47349
0,050	551,133	47301

2p6c		
cv	P (prod.)	p (Σ esp.)
0,00000001	552,000	72542
0,005	552,000	72529
0,010	552,000	72511
0,015	552,000	72506
0,020	552,000	72493
0,025	551,992	72479
0,030	551,866	72466
0,035	551,870	72439
0,040	551,445	72413
0,045	551,358	72383
0,050	551,353	72367

3p9c		
cv	P (prod.)	p (Σ esp.)
0,00000001	827,667	108910
0,005	827,590	108886
0,010	827,593	108856
0,015	827,668	108814
0,020	827,542	108781
0,025	827,514	108773
0,030	827,509	108721
0,035	827,234	108702
0,040	827,110	108647
0,045	826,876	108601
0,050	826,557	108562

E.2.2 $0\% < cv < 5\%$ – passo 0,25% (resumo)

1p3c		
cv	P (prod.)	p (Σ esp.)
0,00000001	276,000	36237
0,003	276,000	36236
0,005	276,000	36236
0,008	276,000	36238
0,010	276,000	36241
0,013	276,000	36234
0,015	276,000	36231
0,018	276,000	36240
0,020	276,000	36240
0,023	276,000	36234
0,025	275,987	36229
0,028	275,976	36236
0,030	275,969	36217
0,033	275,958	36213
0,035	275,907	36202
0,038	275,827	36198
0,040	275,732	36189
0,043	275,790	36184
0,045	275,735	36185
0,048	275,645	36162
0,050	275,548	36185

2p5c		
<i>cv</i>	P (prod.)	p (Σ esp.)
0,00000001	552,000	47546
0,003	552,000	47531
0,005	552,000	47537
0,008	552,000	47521
0,010	552,000	47503
0,013	552,000	47495
0,015	551,972	47476
0,018	552,000	47446
0,020	552,000	47437
0,023	552,000	47442
0,025	551,892	47424
0,028	551,961	47400
0,030	551,885	47405
0,033	551,770	47400
0,035	551,594	47393
0,038	551,529	47372
0,040	551,629	47350
0,043	551,325	47340
0,045	551,398	47349
0,048	551,322	47373
0,050	551,133	47301

2p6c		
<i>cv</i>	P (prod.)	p (Σ esp.)
0,00000001	552,000	72542
0,003	551,987	72532
0,005	552,000	72529
0,008	551,999	72524
0,010	552,000	72511
0,013	552,000	72505
0,015	552,000	72506
0,018	552,000	72494
0,020	552,000	72493
0,023	551,989	72485
0,025	551,992	72479
0,028	551,943	72468
0,030	551,866	72466
0,033	551,792	72441
0,035	551,870	72439
0,038	551,699	72411
0,040	551,445	72413
0,043	551,406	72405
0,045	551,358	72383
0,048	551,254	72388
0,050	551,353	72367

3p9c		
cv	P (prod.)	p (Σ esp.)
0,00000001	827,667	108910
0,003	827,501	108890
0,005	827,590	108886
0,008	827,782	108871
0,010	827,593	108856
0,013	827,373	108837
0,015	827,668	108814
0,018	827,759	108823
0,020	827,542	108781
0,023	827,635	108772
0,025	827,514	108773
0,028	827,698	108764
0,030	827,509	108721
0,033	827,454	108714
0,035	827,234	108702
0,038	827,119	108652
0,040	827,110	108647
0,043	826,939	108622
0,045	826,876	108601
0,048	826,309	108546
0,050	826,557	108562

4p12c		
cv	P (prod.)	p (Σ esp.)
0,00000001	1041,113	153763
0,003	1043,802	153332
0,005	1040,504	153658
0,008	1047,060	152660
0,010	1042,091	153636
0,013	1044,202	153226
0,015	1037,688	154326
0,018	1045,773	152929
0,020	1043,717	153018
0,023	1043,934	153203
0,025	1044,738	152985
0,028	1044,559	152744
0,030	1041,837	153613
0,033	1044,873	153114
0,035	1041,560	153551
0,038	1048,831	152328
0,040	1040,148	153990
0,043	1040,282	153713
0,045	1044,599	152945
0,048	1042,747	153193
0,050	1047,705	152184

Apêndice F

Quinta abordagem

F.1 Ficheiro de *input*

F.1.1 $0\% < cv < 5\%$ – passo 0,25%

cv	Arrumação	Manobra	Ida	Volta	Descarga
0,00000001	0,012	0,005	0,020086	0,015076	0,006236
0,0025	0,300	0,125	0,502160	0,376898	0,155902
0,0050	0,600	0,250	1,004320	0,753795	0,311804
0,0075	0,900	0,375	1,506480	1,130693	0,467705
0,0100	1,200	0,500	2,008640	1,507590	0,623607
0,0125	1,500	0,625	2,510800	1,884488	0,779509
0,0150	1,800	0,750	3,012960	2,261385	0,935411
0,0175	2,100	0,875	3,515120	2,638283	1,091312
0,0200	2,400	1,000	4,017280	3,015180	1,247214
0,0225	2,700	1,125	4,519440	3,392078	1,403116
0,0250	3,000	1,250	5,021600	3,768975	1,559018
0,0275	3,300	1,375	5,523760	4,145873	1,714919
0,0300	3,600	1,500	6,025920	4,522770	1,870821
0,0325	3,900	1,625	6,528080	4,899668	2,026723
0,0350	4,200	1,750	7,030240	5,276565	2,182625
0,0375	4,500	1,875	7,532400	5,653463	2,338526
0,0400	4,800	2,000	8,034560	6,030360	2,494428
0,0425	5,100	2,125	8,536720	6,407258	2,650330
0,0450	5,400	2,250	9,038880	6,784155	2,806232
0,0475	5,700	2,375	9,541040	7,161053	2,962133
0,0500	6,000	2,500	10,043200	7,537950	3,118035

F.2 Resultados da simulação

F.2.1 48 frotas – $0\% < cv < 5\%$ – passo 0,25% (resumo)

cv	1plc		2plc		3plc		4plc	
	P	p	P	p	P	p	P	p
0,00000001	174,000	9478	174,000	34420	174,000	59352	174,000	84392
0,0025	176,144	9330	175,980	34334	176,043	59317	176,200	84315
0,0050	176,431	9306	176,481	34319	176,511	59309	176,631	84333
0,0075	176,694	9291	176,727	34289	176,612	59309	176,572	84307
0,0100	176,624	9292	176,717	34294	176,953	59289	176,985	84257
0,0125	176,796	9275	176,746	34297	177,021	59273	176,743	84320
0,0150	176,661	9291	176,780	34284	176,955	59300	176,944	84280
0,0175	176,757	9287	176,910	34276	176,975	59258	176,852	84301
0,0200	176,929	9254	176,951	34266	176,813	59280	176,847	84250
0,0225	176,786	9272	176,823	34265	176,920	59268	177,229	84218
0,0250	176,853	9269	176,994	34259	177,018	59235	176,794	84237
0,0275	176,842	9272	177,138	34254	176,934	59225	177,002	84250
0,0300	177,047	9246	176,895	34248	177,102	59230	176,846	84236
0,0325	176,946	9253	176,789	34266	177,154	59231	176,980	84238
0,0350	176,863	9255	176,865	34237	177,006	59222	177,117	84226
0,0375	176,931	9248	176,815	34242	177,108	59226	177,122	84245
0,0400	176,899	9254	176,968	34238	177,070	59228	177,074	84235
0,0425	176,926	9254	176,840	34238	176,916	59224	176,993	84202
0,0450	177,017	9244	176,970	34229	177,063	59223	176,961	84217
0,0475	176,949	9253	177,114	34234	177,021	59214	177,007	84221
0,0500	177,030	9250	176,984	34238	177,162	59207	177,227	84167

<i>cv</i>	1p2c		2p2c		3p2c		4p2c	
	P	p	P	p	P	p	P	p
0,00000001	276,000	11244	348,000	19029	348,000	44120	348,000	68534
0,0025	276,000	11245	350,376	18969	350,647	43868	352,500	68988
0,0050	276,000	11247	350,944	18902	351,010	43958	351,115	68938
0,0075	276,000	11250	351,039	18914	350,455	43976	350,616	68889
0,0100	276,000	11251	350,944	18885	350,945	43942	351,057	68906
0,0125	276,000	11250	350,724	18935	350,749	43846	350,712	68874
0,0150	276,000	11251	350,885	18857	351,945	43860	351,605	68876
0,0175	276,000	11249	351,065	18857	350,897	43851	351,583	68852
0,0200	276,000	11248	350,964	18903	350,760	43916	351,757	68848
0,0225	276,000	11246	350,947	18921	350,857	43933	351,411	68794
0,0250	275,989	11247	351,247	18878	350,735	43904	351,988	68863
0,0275	275,974	11249	351,458	18848	351,038	43892	351,550	68858
0,0300	275,978	11244	351,617	18889	351,714	43825	351,602	68875
0,0325	275,927	11249	350,966	18917	351,157	43912	351,829	68851
0,0350	275,821	11248	351,578	18822	351,467	43851	351,723	68837
0,0375	275,856	11254	351,247	18872	351,194	43883	351,302	68805
0,0400	275,828	11247	351,519	18878	351,677	43832	351,091	68897
0,0425	275,800	11253	351,634	18891	351,310	43858	351,857	68836
0,0450	275,668	11257	350,966	18934	351,545	43907	351,547	68809
0,0475	275,618	11261	351,603	18859	351,155	43876	351,497	68851
0,0500	275,593	11257	352,153	18846	351,737	43800	351,588	68818

<i>cv</i>	1p3c		2p3c		3p3c		4p3c	
	P	p	P	p	P	p	P	p
0,00000001	276,000	36237	522,000	4387	522,000	28923	522,000	53744
0,0025	276,000	36236	523,807	4146	524,417	28616	522,000	53219
0,0050	276,000	36236	524,873	4011	525,000	28639	524,867	53633
0,0075	276,000	36238	525,382	4140	524,923	28634	524,569	53632
0,0100	276,000	36241	525,628	4057	524,995	28557	524,199	53585
0,0125	276,000	36234	524,621	4114	525,076	28614	525,279	53578
0,0150	276,000	36231	523,413	4244	525,125	28630	525,641	53614
0,0175	276,000	36240	523,970	4335	524,902	28612	525,378	53647
0,0200	276,000	36240	523,645	4371	524,789	28581	525,066	53597
0,0225	276,000	36234	522,674	4409	525,769	28523	525,805	53629
0,0250	275,987	36229	522,142	4555	525,843	28625	525,898	53482
0,0275	275,976	36236	522,352	4560	525,912	28617	525,943	53626
0,0300	275,969	36217	522,307	4589	525,338	28662	526,500	53657
0,0325	275,958	36213	522,083	4634	525,585	28629	526,556	53604
0,0350	275,907	36202	522,043	4728	525,804	28600	525,915	53612
0,0375	275,827	36198	522,200	4823	525,757	28611	525,274	53556
0,0400	275,732	36189	522,060	4954	526,104	28503	525,405	53613
0,0425	275,790	36184	521,282	4959	525,837	28638	526,058	53659
0,0450	275,735	36185	520,902	5048	526,079	28640	525,878	53691
0,0475	275,645	36162	519,957	5148	526,497	28540	524,888	53684
0,0500	275,548	36185	519,915	5275	526,144	28622	525,678	53754

<i>cv</i>	1p4c		2p4c		3p4c		4p4c	
	P	p	P	p	P	p	P	p
0,00000001	276,000	61404	552,000	22557	696,000	14008	696,000	38488
0,0025	276,000	61403	552,000	22552	698,524	13753	698,229	38351
0,0050	276,000	61407	552,000	22550	698,450	13696	697,566	37853
0,0075	276,000	61411	552,000	22563	699,846	13608	699,305	38336
0,0100	276,000	61415	552,000	22553	698,671	13824	698,805	38413
0,0125	276,000	61407	551,967	22550	699,537	13778	698,292	38428
0,0150	276,000	61405	552,000	22539	699,046	13823	699,366	38435
0,0175	276,000	61400	552,000	22533	699,040	13873	698,718	38511
0,0200	276,000	61409	551,997	22543	699,958	13799	699,113	38539
0,0225	276,000	61401	551,994	22530	700,500	13587	700,483	38398
0,0250	275,987	61396	551,984	22533	699,291	13801	698,773	38552
0,0275	275,977	61404	551,935	22535	699,112	13863	699,660	38420
0,0300	275,965	61384	551,933	22550	699,975	13831	700,137	38317
0,0325	275,952	61373	551,724	22556	699,393	13892	700,319	38386
0,0350	275,893	61362	551,861	22540	698,398	14043	699,263	38574
0,0375	275,873	61357	551,682	22547	699,175	13985	699,884	38649
0,0400	275,824	61334	551,766	22522	699,390	14007	699,410	38658
0,0425	275,831	61337	551,537	22539	699,220	14058	700,528	38574
0,0450	275,677	61354	551,712	22583	698,803	14070	699,368	38650
0,0475	275,730	61329	551,260	22548	698,715	14134	699,623	38627
0,0500	275,650	61345	551,314	22553	698,530	14217	700,176	38585

<i>cv</i>	1p5c		2p5c		3p5c		4p5c	
	P	p	P	p	P	p	P	p
0,00000001	276,000	86571	552,000	47546	820,893	10862	868,603	24165
0,0025	276,000	86571	552,000	47531	822,000	10621	869,299	24442
0,0050	276,000	86578	552,000	47537	820,757	10956	870,791	24248
0,0075	276,000	86585	552,000	47521	820,054	11088	869,941	24382
0,0100	276,000	86590	552,000	47503	820,255	11092	870,498	24331
0,0125	276,000	86580	552,000	47495	820,193	11127	869,832	24418
0,0150	276,000	86580	551,972	47476	820,294	11083	870,091	24373
0,0175	276,000	86569	552,000	47446	820,345	11073	870,735	24281
0,0200	276,000	86579	552,000	47437	819,877	11132	870,855	24265
0,0225	276,000	86568	552,000	47442	819,515	11190	869,924	24605
0,0250	275,987	86563	551,892	47424	819,080	11267	870,818	24332
0,0275	275,977	86570	551,961	47400	818,233	11381	870,154	24543
0,0300	275,965	86547	551,885	47405	818,075	11400	868,897	24696
0,0325	275,952	86533	551,770	47400	817,581	11499	870,048	24540
0,0350	275,893	86524	551,594	47393	817,756	11535	870,560	24460
0,0375	275,873	86515	551,529	47372	816,378	11828	870,838	24426
0,0400	275,824	86490	551,629	47350	816,073	11843	870,527	24454
0,0425	275,831	86494	551,325	47340	815,875	11891	869,031	24745
0,0450	275,677	86509	551,398	47349	815,505	11970	870,413	24510
0,0475	275,730	86481	551,322	47373	814,917	12084	868,772	24914
0,0500	275,650	86499	551,133	47301	814,765	12144	868,702	24926

<i>cv</i>	1p6c		2p6c		3p6c		4p6c	
	P	p	P	p	P	p	P	p
0,00000001	276,000	111738	552,000	72542	826,095	34258	1009,514	17227
0,0025	276,000	111739	551,987	72532	826,230	34228	1004,661	18392
0,0050	276,000	111749	552,000	72529	826,482	34193	1007,978	17580
0,0075	276,000	111758	551,999	72524	826,867	34179	1004,857	18345
0,0100	276,000	111764	552,000	72511	826,422	34206	1007,242	17748
0,0125	276,000	111753	552,000	72505	826,706	34135	1007,998	17608
0,0150	276,000	111754	552,000	72506	826,293	34220	1005,577	18225
0,0175	276,000	111738	552,000	72494	826,733	34063	1005,937	18055
0,0200	276,000	111748	552,000	72493	826,577	34090	1004,350	18372
0,0225	276,000	111736	551,989	72485	826,972	34005	1005,777	18105
0,0250	275,987	111730	551,992	72479	826,904	34028	1004,591	18275
0,0275	275,977	111736	551,943	72468	827,440	33946	1004,236	18446
0,0300	275,965	111710	551,866	72466	826,514	34092	1005,823	18180
0,0325	275,952	111693	551,792	72441	826,220	34071	1000,887	19250
0,0350	275,893	111685	551,870	72439	826,441	34008	998,025	19865
0,0375	275,873	111673	551,699	72411	826,464	34048	1002,176	18905
0,0400	275,824	111646	551,445	72413	826,483	34043	1003,806	18598
0,0425	275,831	111650	551,406	72405	825,972	34067	1001,260	19115
0,0450	275,677	111664	551,358	72383	825,905	34086	1005,211	18209
0,0475	275,730	111633	551,254	72388	825,966	34030	998,984	19560
0,0500	275,650	111653	551,353	72367	826,004	34065	1000,659	19282

<i>cv</i>	1p7c		2p7c		3p7c		4p7c	
	P	p	P	p	P	p	P	p
0,00000001	276,000	136905	552,000	97710	826,791	59061	1028,913	36766
0,0025	276,000	136906	551,983	97703	827,585	58935	1026,183	37490
0,0050	276,000	136920	552,000	97704	828,000	58888	1032,890	35852
0,0075	276,000	136931	551,999	97704	827,057	58966	1036,313	35132
0,0100	276,000	136938	552,000	97692	827,069	58973	1032,030	36126
0,0125	276,000	136926	552,000	97685	827,306	58906	1031,421	36139
0,0150	276,000	136929	552,000	97687	827,163	58868	1030,170	36443
0,0175	276,000	136907	552,000	97673	827,535	58827	1039,656	34496
0,0200	276,000	136917	552,000	97672	827,482	58825	1030,161	36495
0,0225	276,000	136903	551,990	97664	827,544	58718	1034,790	35441
0,0250	275,987	136897	551,992	97656	827,352	58735	1026,689	36818
0,0275	275,977	136902	551,936	97644	827,280	58747	1033,569	35782
0,0300	275,965	136873	551,896	97651	827,651	58685	1034,671	35403
0,0325	275,952	136853	551,776	97621	827,372	58659	1026,529	37156
0,0350	275,893	136846	551,776	97616	826,763	58685	1028,890	36732
0,0375	275,873	136831	551,666	97589	826,712	58664	1028,701	36660
0,0400	275,824	136802	551,492	97563	826,873	58661	1038,501	34665
0,0425	275,831	136806	551,446	97580	826,531	58674	1036,791	35006
0,0450	275,677	136819	551,432	97555	826,351	58650	1030,946	36332
0,0475	275,730	136785	551,266	97539	826,104	58627	1035,362	35307
0,0500	275,650	136807	551,310	97522	826,613	58578	1029,474	36856

<i>cv</i>	1p8c		2p8c		3p8c		4p8c	
	P	p	P	p	P	p	P	p
0,00000001	276,000	162072	552,000	122878	828,000	83897	1038,497	58469
0,0025	276,000	162074	551,983	122874	828,000	83878	1039,002	58359
0,0050	276,000	162091	552,000	122880	827,448	83890	1037,009	58804
0,0075	276,000	162105	551,999	122884	827,667	83880	1040,171	58238
0,0100	276,000	162113	552,000	122872	827,396	83877	1042,201	57908
0,0125	276,000	162099	552,000	122866	827,501	83832	1037,689	58676
0,0150	276,000	162103	552,000	122868	827,523	83794	1037,706	58704
0,0175	276,000	162076	552,000	122851	827,703	83783	1043,474	57497
0,0200	276,000	162087	552,000	122850	827,552	83712	1033,030	59745
0,0225	276,000	162070	551,990	122842	827,756	83722	1038,324	58501
0,0250	275,987	162064	551,992	122834	827,513	83683	1040,125	58275
0,0275	275,977	162068	551,936	122819	827,573	83682	1038,593	58245
0,0300	275,965	162036	551,896	122826	827,398	83658	1035,550	59337
0,0325	275,952	162013	551,776	122796	827,527	83615	1040,500	58195
0,0350	275,893	162007	551,776	122790	827,247	83584	1030,412	60209
0,0375	275,873	161989	551,666	122761	827,089	83599	1038,650	58372
0,0400	275,824	161958	551,492	122734	827,015	83600	1035,597	59172
0,0425	275,831	161962	551,446	122752	826,874	83551	1032,679	59739
0,0450	275,677	161974	551,432	122724	826,568	83526	1038,940	58471
0,0475	275,730	161937	551,266	122710	826,938	83493	1036,260	59036
0,0500	275,650	161961	551,310	122693	826,212	83456	1042,276	57643

<i>cv</i>	1p9c		2p9c		3p9c		4p9c	
	P	p	P	p	P	p	P	p
0,00000001	276,000	187239	552,000	148046	827,667	108910	1042,722	81412
0,0025	276,000	187241	551,983	148044	827,501	108890	1041,130	81696
0,0050	276,000	187261	552,000	148056	827,590	108886	1042,822	81473
0,0075	276,000	187278	551,999	148065	827,782	108871	1037,361	82701
0,0100	276,000	187287	552,000	148053	827,593	108856	1036,523	82881
0,0125	276,000	187272	552,000	148047	827,373	108837	1037,923	82568
0,0150	276,000	187278	552,000	148049	827,668	108814	1043,812	81313
0,0175	276,000	187245	552,000	148030	827,759	108823	1040,924	81925
0,0200	276,000	187256	552,000	148029	827,542	108781	1039,114	82234
0,0225	276,000	187237	551,990	148020	827,635	108772	1040,764	82012
0,0250	275,987	187231	551,992	148011	827,514	108773	1046,445	80927
0,0275	275,977	187234	551,936	147995	827,698	108764	1041,071	81859
0,0300	275,965	187200	551,896	148002	827,509	108721	1041,374	81663
0,0325	275,952	187173	551,776	147970	827,454	108714	1035,042	83120
0,0350	275,893	187168	551,776	147964	827,234	108702	1043,334	81380
0,0375	275,873	187146	551,666	147933	827,119	108652	1045,237	81188
0,0400	275,824	187114	551,492	147904	827,110	108647	1041,524	81642
0,0425	275,831	187118	551,446	147924	826,939	108622	1036,483	82856
0,0450	275,677	187129	551,432	147893	826,876	108601	1044,813	81084
0,0475	275,730	187089	551,266	147881	826,309	108546	1041,320	81724
0,0500	275,650	187115	551,310	147863	826,557	108562	1035,109	82973

<i>cv</i>	1p10c		2p10c		3p10c		4p10c	
	P	p	P	p	P	p	P	p
0,00000001	276,000	212407	552,000	173214	827,451	134053	1038,093	106263
0,0025	276,000	212409	551,983	173215	827,613	134049	1037,673	106336
0,0050	276,000	212432	552,000	173231	827,676	134051	1043,765	105306
0,0075	276,000	212452	551,999	173245	827,528	134041	1040,204	105610
0,0100	276,000	212461	552,000	173234	827,527	134017	1041,886	105514
0,0125	276,000	212445	552,000	173227	827,744	134011	1042,426	105454
0,0150	276,000	212452	552,000	173230	827,724	133980	1043,092	105240
0,0175	276,000	212414	552,000	173208	827,641	133987	1039,283	106400
0,0200	276,000	212425	552,000	173207	827,634	133964	1040,852	105891
0,0225	276,000	212405	551,990	173198	827,732	133946	1045,236	104913
0,0250	275,987	212398	551,992	173188	827,633	133938	1048,523	104451
0,0275	275,977	212400	551,936	173170	827,399	133920	1041,244	105462
0,0300	275,965	212363	551,896	173177	827,552	133893	1045,130	104865
0,0325	275,952	212333	551,776	173145	827,482	133894	1040,298	105715
0,0350	275,893	212329	551,776	173138	827,045	133862	1044,947	104833
0,0375	275,873	212304	551,666	173105	827,332	133845	1044,280	104993
0,0400	275,824	212270	551,492	173074	827,160	133807	1034,798	107007
0,0425	275,831	212274	551,446	173095	826,794	133805	1038,642	106161
0,0450	275,677	212284	551,432	173063	826,614	133771	1047,178	104525
0,0475	275,730	212241	551,266	173052	826,750	133749	1044,845	104928
0,0500	275,650	212268	551,310	173034	826,603	133706	1039,436	106141

<i>cv</i>	1p11c		2p11c		3p11c		4p11c	
	P	p	P	p	P	p	P	p
0,00000001	276,000	237574	552,000	198382	827,573	159223	1040,534	129917
0,0025	276,000	237576	551,983	198386	827,607	159216	1040,661	129769
0,0050	276,000	237603	552,000	198407	827,701	159230	1041,285	129642
0,0075	276,000	237625	551,999	198426	827,744	159233	1044,449	128885
0,0100	276,000	237636	552,000	198414	827,694	159204	1048,528	128143
0,0125	276,000	237618	552,000	198408	827,811	159204	1047,287	128702
0,0150	276,000	237627	552,000	198411	827,764	159171	1041,488	129728
0,0175	276,000	237583	552,000	198387	827,556	159143	1040,184	130086
0,0200	276,000	237595	552,000	198386	827,504	159124	1043,139	129293
0,0225	276,000	237572	551,990	198377	827,701	159137	1046,247	128816
0,0250	275,987	237565	551,992	198365	827,713	159113	1045,823	128408
0,0275	275,977	237566	551,936	198345	827,611	159096	1037,673	130260
0,0300	275,965	237526	551,896	198353	827,524	159091	1039,184	130066
0,0325	275,952	237493	551,776	198319	827,584	159038	1044,413	129111
0,0350	275,893	237490	551,776	198313	827,105	159028	1044,043	129142
0,0375	275,873	237462	551,666	198278	827,280	159015	1045,661	128595
0,0400	275,824	237426	551,492	198245	827,018	158967	1037,635	130495
0,0425	275,831	237430	551,446	198267	826,982	158989	1041,201	129534
0,0450	275,677	237438	551,432	198232	826,801	158920	1042,179	129475
0,0475	275,730	237393	551,266	198222	826,661	158933	1047,483	128421
0,0500	275,650	237422	551,310	198204	826,633	158882	1049,563	128090

<i>cv</i>	1p12c		2p12c		3p12c		4p12c	
	P	p	P	p	P	p	P	p
0,00000001	276,000	262741	552,000	223549	827,613	184392	1041,113	153763
0,0025	276,000	262744	551,983	223557	827,662	184389	1043,802	153332
0,0050	276,000	262774	552,000	223582	827,713	184409	1040,504	153658
0,0075	276,000	262799	551,999	223606	827,636	184410	1047,060	152660
0,0100	276,000	262810	552,000	223595	827,710	184385	1042,091	153636
0,0125	276,000	262790	552,000	223589	827,705	184369	1044,202	153226
0,0150	276,000	262801	552,000	223592	827,766	184349	1037,688	154326
0,0175	276,000	262752	552,000	223565	827,543	184336	1045,773	152929
0,0200	276,000	262764	552,000	223564	827,535	184313	1043,717	153018
0,0225	276,000	262739	551,990	223555	827,759	184318	1043,934	153203
0,0250	275,987	262733	551,992	223543	827,751	184299	1044,738	152985
0,0275	275,977	262732	551,936	223521	827,598	184255	1044,559	152744
0,0300	275,965	262689	551,896	223528	827,438	184263	1041,837	153613
0,0325	275,952	262653	551,776	223494	827,544	184226	1044,873	153114
0,0350	275,893	262651	551,776	223487	827,162	184208	1041,560	153551
0,0375	275,873	262620	551,666	223450	827,318	184215	1048,831	152328
0,0400	275,824	262582	551,492	223415	827,132	184159	1040,148	153990
0,0425	275,831	262587	551,446	223439	826,957	184165	1040,282	153713
0,0450	275,677	262593	551,432	223401	826,722	184094	1044,599	152945
0,0475	275,730	262545	551,266	223393	826,759	184117	1042,747	153193
0,0500	275,650	262576	551,310	223375	826,578	184046	1047,705	152184

Apêndice G

Sexta abordagem

G.1 Tabelas de *input*

G.1.1 ($3\% < cv < 3,5\%$ – passo 0,0005)

<i>cv</i>	Arrumação	Manobra	Ida	Volta	Descarga
0,0300	3,60	1,500	6,025920	4,52277000	1,87082100
0,0305	3,66	1,525	6,126352	4,59814950	1,90200135
0,0310	3,72	1,550	6,226784	4,67352900	1,93318170
0,0315	3,78	1,575	6,327216	4,74890850	1,96436205
0,0320	3,84	1,600	6,427648	4,82428800	1,99554240
0,0325	3,90	1,625	6,528080	4,89966750	2,02672275
0,0330	3,96	1,650	6,628512	4,97504700	2,05790310
0,0335	4,02	1,675	6,728944	5,05042650	2,08908345
0,0340	4,08	1,700	6,829376	5,12580600	2,12026380
0,0345	4,14	1,725	6,929808	5,20118550	2,15144415
0,0350	4,20	1,750	7,030240	5,27656500	2,18262450

G.1.2 ($3\% < cv < 3,5\%$ – passo 0,00025)

<i>cv</i>	Arrumação	Manobra	Ida	Volta	Descarga
0,03000	3,60	1,5000	6,025920	4,52277000	1,87082100
0,03025	3,63	1,5125	6,076136	4,56045975	1,88641118
0,03050	3,66	1,5250	6,126352	4,59814950	1,90200135
0,03075	3,69	1,5375	6,176568	4,63583925	1,91759153
0,03100	3,72	1,5500	6,226784	4,67352900	1,93318170
0,03125	3,75	1,5625	6,277000	4,71121875	1,94877188
0,03150	3,78	1,5750	6,327216	4,74890850	1,96436205
0,03175	3,81	1,5875	6,377432	4,78659825	1,97995223
0,03200	3,84	1,6000	6,427648	4,82428800	1,99554240
0,03225	3,87	1,6125	6,477864	4,86197775	2,01113258
0,03250	3,90	1,6250	6,528080	4,89966750	2,02672275
0,03275	3,93	1,6375	6,578296	4,93735725	2,04231293
0,03300	3,96	1,6500	6,628512	4,97504700	2,05790310
0,03325	3,99	1,6625	6,678728	5,01273675	2,07349328
0,03350	4,02	1,6750	6,728944	5,05042650	2,08908345
0,03375	4,05	1,6875	6,779160	5,08811625	2,10467363
0,03400	4,08	1,7000	6,829376	5,12580600	2,12026380
0,03425	4,11	1,7125	6,879592	5,16349575	2,13585398
0,03450	4,14	1,7250	6,929808	5,20118550	2,15144415
0,03475	4,17	1,7375	6,980024	5,23887525	2,16703433
0,03500	4,20	1,7500	7,030240	5,27656500	2,18262450

G.1.3 ($3,5\% < cv < 4\%$ – passo 0,00025)

cv	Arrumação	Manobra	Ida	Volta	Descarga
0,03500	4,20	1,7500	7,030240	5,276565	2,182625
0,03525	4,23	1,7625	7,080456	5,314255	2,198215
0,03550	4,26	1,7750	7,130672	5,351945	2,213805
0,03575	4,29	1,7875	7,180888	5,389634	2,229395
0,03600	4,32	1,8000	7,231104	5,427324	2,244985
0,03625	4,35	1,8125	7,281320	5,465014	2,260575
0,03650	4,38	1,8250	7,331536	5,502704	2,276166
0,03675	4,41	1,8375	7,381752	5,540393	2,291756
0,03700	4,44	1,8500	7,431968	5,578083	2,307346
0,03725	4,47	1,8625	7,482184	5,615773	2,322936
0,03750	4,50	1,8750	7,532400	5,653463	2,338526
0,03775	4,53	1,8875	7,582616	5,691152	2,354116
0,03800	4,56	1,9000	7,632832	5,728842	2,369707
0,03825	4,59	1,9125	7,683048	5,766532	2,385297
0,03850	4,62	1,9250	7,733264	5,804222	2,400887
0,03875	4,65	1,9375	7,783480	5,841911	2,416477
0,03900	4,68	1,9500	7,833696	5,879601	2,432067
0,03925	4,71	1,9625	7,883912	5,917291	2,447657
0,03950	4,74	1,9750	7,934128	5,954981	2,463248
0,03975	4,77	1,9875	7,984344	5,992670	2,478838
0,04000	4,80	2,0000	8,034560	6,030360	2,494428

G.2 Resultados da simulação

G.2.1 2p6c (resumo)

<i>cv</i>	1000r P	cc0,5% p	32.000r P	cc0,5% p	100.000r P	cc0,005% p	2.000.000r P	cc0,005% p
3,000%	551,866	72466	551,886	72467	551,887	72467	551,884	72467
3,025%	551,859	72467	551,884	72467	551,881	72467	551,879	72467
3,050%	551,805	72469	551,867	72467	551,870	72466	551,874	72465
3,075%	551,890	72460	551,860	72464	551,864	72464	551,867	72465
3,100%	551,913	72478	551,876	72462	551,866	72463	551,861	72464
3,125%	551,845	72458	551,843	72461	551,847	72462	551,854	72462
3,150%	551,751	72463	551,830	72464	551,840	72462	551,845	72460
3,175%	551,830	72469	551,841	72459	551,841	72459	551,839	72460
3,200%	551,901	72447	551,842	72457	551,834	72458	551,831	72458
3,225%	551,849	72452	551,827	72457	551,827	72457	551,824	72457
3,250%	551,792	72441	551,815	72451	551,816	72454	551,816	72455
3,275%	551,792	72433	551,818	72455	551,817	72455	551,812	72454
3,300%	551,869	72450	551,803	72454	551,807	72455	551,808	72455
3,325%	551,785	72455	551,799	72453	551,799	72452	551,798	72451
3,350%	551,797	72450	551,789	72449	551,789	72450	551,788	72451
3,375%	551,805	72447	551,782	72447	551,777	72450	551,769	72448
3,400%	551,610	72448	551,754	72446	551,763	72448	551,768	72449
3,425%	551,722	72455	551,757	72446	551,759	72447	551,761	72448
3,450%	551,734	72444	551,751	72444	551,756	72445	551,758	72446
3,475%	551,706	72441	551,752	72448	551,756	72448	551,748	72446
3,500%	551,870	72439	551,754	72440	551,741	72440	551,738	72442

G.2.2 2p5c (resumo)

<i>cv</i>	<500r	<i>cc</i> 0,5%	<8.000r	<i>cc</i> 0,05%	32.000r	<i>cc</i> 0,005%
	P	p	P	p	P	p
0,03500	551,594	47393	551,718	47392	551,726	47390
0,03525	551,801	47415	551,751	47392	551,733	47390
0,03550	551,729	47380	551,718	47384	551,719	47385
0,03575	551,735	47404	551,707	47394	551,710	47389
0,03600	551,703	47380	551,695	47382	551,703	47386
0,03625	551,887	47407	551,705	47387	551,690	47381
0,03650	551,728	47365	551,715	47379	551,697	47381
0,03675	551,693	47390	551,681	47378	551,674	47379
0,03700	551,645	47357	551,671	47373	551,673	47377
0,03725	551,651	47376	551,642	47376	551,658	47378
0,03750	551,628	47364	551,637	47377	551,635	47378
0,03775	551,652	47354	551,624	47371	551,634	47375
0,03800	551,518	47362	551,647	47373	551,647	47373
0,03825	551,609	47385	551,630	47375	551,632	47373
0,03850	551,424	47351	551,606	47370	551,604	47372
0,03875	551,739	47410	551,630	47383	551,618	47376
0,03900	551,482	47376	551,568	47370	551,593	47371
0,03925	551,757	47392	551,640	47373	551,619	47371
0,03950	551,500	47380	551,539	47365	551,565	47366
0,03975	551,564	47361	551,555	47367	551,552	47366
0,04000	551,629	47350	551,588	47367	551,559	47366

G.2.3 4p2c (resumo)

<i>cv</i>	<300r	<i>cc</i> 0,5%	32.000r	<i>cc</i> 0,005%
	P	p	P	p
0,03000	348,000	68534	351,425	68869
0,03025	352,500	68988	351,394	68867
0,03050	351,115	68938	351,399	68866
0,03075	350,616	68889	351,418	68862
0,03100	351,057	68906	351,392	68866
0,03125	350,712	68874	351,382	68871
0,03150	351,605	68876	351,402	68867
0,03175	351,583	68852	351,376	68869
0,03200	351,757	68848	351,390	68861
0,03225	351,411	68794	351,407	68865
0,03250	351,988	68863	351,440	68866
0,03275	351,550	68858	351,422	68855
0,03300	351,602	68875	351,415	68867
0,03325	351,829	68851	351,366	68867
0,03350	351,723	68837	351,458	68862
0,03375	351,302	68805	351,425	68869
0,03400	351,091	68897	351,482	68860
0,03425	351,857	68836	351,398	68865
0,03450	351,547	68809	351,456	68863
0,03475	351,497	68851	351,476	68858
0,03500	351,588	68818	351,426	68863

G.2.4 3p2c (resumo)

<i>cv</i>	<300r	<i>cc</i> 0,5%	32.000r	<i>cc</i> 0,005%
	P	p	P	p
0,03500	348,000	44120	351,416	43868
0,03525	350,647	43868	351,413	43870
0,03550	351,010	43958	351,416	43872
0,03575	350,455	43976	351,413	43866
0,03600	350,945	43942		
0,03625	350,749	43846		
0,03650	351,945	43860		
0,03675	350,897	43851		
0,03700	350,760	43916		
0,03725	350,857	43933		
0,03750	350,735	43904		
0,03775	351,038	43892		
0,03800	351,714	43825		
0,03825	351,157	43912		
0,03850	351,467	43851		
0,03875	351,194	43883		
0,03900	351,677	43832		
0,03925	351,310	43858		
0,03950	351,545	43907		
0,03975	351,155	43876		
0,04000	351,737	43800		

Bibliografia

- [1] Bertalanffy L.V. e outros. *Teoria dos Sistemas*. Editora da Fundação Getulio Vargas, Rio de Janeiro, Brasil, 1976.
- [2] Carvalho J.C. e outros. Sistema: Modelo conceptual de um objecto. <http://piano.dsi.uminho.pt/jac/SI/zdocumentos/sistemas.pdf>, 2002.
- [3] Ehrenberger V. and Fajkos A. *Mining Modelling*. SNTL-Publishers of Technical Literature, Prague, Czechoslovakia, 1990.
- [4] Geymonat L. *Elementos de Filosofia da Ciência*. Gradiva Publicações, Lisboa, 1985.
- [5] Hilborn R.C. *Chaos and Nonlinear Dynamics, An Introduction for Scientists and Engineers*. Oxford University Press, Inc., New York, 1994.
- [6] Kalasky D.R. and Davis D.A. Computer animation with cinema. In Nelson B. Kelton W. and Clark G., editors, *Proceedings of the 1991 Winter Simulation Conference*, San-Diego, California, USA, 1991. Society for Computer Simulation.
- [7] Kalasky D.R. Simulation-based supply-chain optimization for consumer products. In Charnes Morrice Brunner and Swain, editors, *Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference*, San-Diego, California, USA, 1996. Society for Computer Simulation.
- [8] Kalasky D.R. Kolonja B. and Mutmanský J. Optimization of dispatching criteria for open-pit truck haulage system design using multiple comparasions with the best and common random numbers. In Evans Mollaghasemi Russel and Biles, editors, *Proceedings of the 1993 Winter Simulation Conference*, San-Diego, California, USA, 1993. Society for Computer Simulation.
- [9] Lamport L. *Latex, A Document Preparation System*. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, USA, 2nd edition, 1994.
- [10] Leite A.J.M. *Simulação de Sistemas de Transporte e Armazenamento. Aula Para Uma Nova Disciplina*. Departamento de Minas da Faculdade de Engenharia da universidade do Porto, Porto, Portugal, 1990.
- [11] Leite A.J.M. *Simulação de Transporte e Armazenamento em Lavra a Céu Aberto. Novos Critérios de Dimensionamento*. Departamento de Minas da Faculdade de Engenharia da universidade do Porto, Porto, Portugal, 1990.
- [12] Leite A.J.M. *Transformação de Um Objecto da Indústria Extractiva em Sistema. Algumas Consequências*. PhD thesis, Departamento de Minas da Faculdade de Engenharia da universidade do Porto, Porto, Portugal, 1998.
- [13] Madureira C.M.N. A metodologia sistémica. *Geo-Sistemas*, 1:12–35, 1992.
- [14] Madureira C.M.N. Projecto sistémico. *Geo-Sistemas*, 2:9–48, 1993.
- [15] Madureira C.M.N. A trama geológica da história do homem. *Geonovas*, 1(16):119–134, 2002.
- [16] Mandelbrot B. *Objectos Fractais*. Gradiva-Publicações, Lda, Lisboa, Portugal, 1998.
- [17] Miranda H.S.B. *Transportes Mineiros. Efeitos Peculiares da Disciplina de Fecho do Relevo*. PhD thesis, Departamento de Minas da Faculdade de Engenharia da universidade do Porto, Porto, Portugal, 1986.

- [18] Miranda H.S.B. e Leite A.J.M. Análise de sistemas de carga e transporte: Uma abordagem determinística. In *Actas das IIIs Jornadas Técnicas da AIPGN*, Porto, Portugal, 1996. AIPGN.
- [19] Miranda H.S.B. *Uma Estratégia Para Dimensionamento Preliminar de Processos de Carga, Transporte e Armazenamento de Sólidos Granulares*. Departamento de Minas da Faculdade de Engenharia da universidade do Porto, Porto, Portugal, 2000.
- [20] Muduli P.K. and Yegualp T.M. Modeling truck-shovel systems as closed queueing network with multiple job classes. In *International Transactions in Operational Research*, volume 3, pages 89–98, Great Britain, 1996. IFORS, Elsevier Science.
- [21] Nascimento M.N.S. *Análise de Resultados de Uma Simulação de Um Processo Não-Ergódico. Sobre Um Exemplo da Indústria Extractiva*. PhD thesis, Universidade de Trás-Os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 1998.
- [22] Prigogine I. and Stengers I. *Order Out of Chaos, Man's New Dialog with Nature*. HarperCollinsPublishers, Hammersmith, London, 1985.
- [23] Ramani R.V. *Haulage and Transportation*, chapter 6, pages 658–691. Society for Mining Metallurgy and Exploration, Baltimore, Maryland, USA, 1990.
- [24] Rist K.A. Computer simulation for solution of a mine transportation problem. *Mining World*, 14(12):19–22, Dec 1961.
- [25] Sturgul J.R. Modeling and simulation in mining. *The Society for Modeling and Simulation International*, May 2001.

Índice

bacia de atracção, 113

aleatoriedade, 87
atractor, 113
atrasos operacionais, 9
atrasos variáveis, 9

camhões de estaleiro, 5
caos, 110
caótica, 65
caótico, 110
ciclo da pá, 7
ciclo do camião, 8
ciclo efectivo da pá, 7
ciclo efectivo do camião, 8
ciclo mínimo da pá, 7
ciclo mínimo do camião, 8
coeficiente de variação, 52
comportamento dinâmico, 26

desvio-padrão, 51
determinismo, 54
dimensão fractal, 100
dinâmica não-linear, 110
disciplina de fecho do relevo, 115
dispatching, 107
dumpers, 5

efeito borboleta, 111
espaço-fase, 120
exploração a céu-aberto, 3

fractal, 100
frotas equivalentes, 140
frotas máximas, 142
frotas mínimas, 141
função objectivo, 58

indústria extractiva, 3

linearidade, 110

manobra de arrumação, 49
manobra de descarga, 50
manobra unitária da pá, 49
medidas de dispersão, 51
medidas de dispersão relativa, 52
medidas de localização, 51
modelagem fenomenológica, 27
modelagem regressiva, 27

média, 51

não-linearidade, 110

problema dos 3 corpos, 119
produtividade, 53, 55
produção, 53
produção patamar, 139
pás-carregadoras, 5

relevos, 59
retro-escavadoras, 5

Secção de Poincaré, 120
sistema conservativo, 114
sistema de carga e transporte, 4, 29

tempo de espera, 7, 8
tempo de inactividade, 7
tempo médio, 51
tempo total de ciclo, 10
tempo total de ciclo da pá, 8
tempo total espera fila britador, 109
tempo total espera fila carga, 109
tempos totais de espera, 55
teoria do caos, 110

variabilidade, 52
variância, 51
viagem de ida, 50
viagem de regresso, 50